

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



UNIVERSITÉ AKLI MOHAND OULHADJ–BOUIRA-

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre
Département : Biologie
Laboratoire : Laboratoire de gestion et valorisation des ressources naturelles et assurance qualité.

THÈSE
EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE DOCTORAT
Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Ecologie et Environnement

Spécialité: Eau et environnement

Présentée par

BAKHTI Fatima ZAHRA

**Suivi et évaluation des effets des pesticides sur les
composantes de l'environnement au niveau de la wilaya de
M'sila.**

Soutenu le 28. / 06. /2025

Devant le Jury composé de:

Nom et Prénom

Grade

Mme. MOUHOUB-SAYAH chafika

Prof.

Univ. de Bouira

Présidente

M. ZOUGGAGHE Fatah

Prof.

Univ. de Bouira

Rapporteur

Mme. MAIZI Naila

MCA.

Univ. de Bouira

Examinatrice

M. BOUNAR Rabah

Prof.

Univ. de M'sila

Examineur

M. Missaoui Khaled

MCA.

Univ. de Sétif 1

Examineur

M. Ben Saci Tayeb

Prof.

Univ. de M'sila

Invité

Année universitaire : 2025-2026

TABLE DES MATIÈRES

Introduction :	1
----------------------	---

Chapitre I : Synthèse bibliographique

1- Historique des pesticides.....	5
1.1. Les premières utilisations dans l'Antiquité	5
1.2. Le développement de la chimie minérale (XIX ^{ème} siècle).....	5
1.3. Le développement de la chimie organique au cours du XX ^{ème} siècle	5
1.4 Période d'après-guerre et industrialisation massive	6
1.5. Prises de conscience et réglementations (1960 – aujourd'hui).....	6
2- Définitions.....	8
2.1. Les Pesticides	8
2.2. Les adjuvants	9
2.3. Les ravageurs	9
3- Classification des pesticides	9
3.1. Les insecticides.....	9
3.1.1. Les organochlorés	9
3.1.2. Les organophosphorés	10
3.1.3. Les carbamates.....	10
3.1.4. Les pyréthrinoïdes de synthèse	10
3.2. Les herbicides	11
3.3. Les fongicides.....	12
4. Utilisation des pesticides :.....	14
4.1. Utilisation des pesticides au niveau mondial :.....	14
4.2. Utilisation des pesticides au niveau national :.....	15
5. l'impact des pesticides :	19
5.1. Impact sur le sol :.....	19
5.2. Impact sur l'eau :	20
5.3. Impact sur la biodiversité :	20
5.4. Impact sur la santé humaine :	21
6. La persistance des pesticides :.....	21
7.Utilisation raisonnée et durable des pesticides:.....	22
8. Alternatives aux pesticides :.....	22

Chapitre II : La zone d'étude

1. Présentation géographique et administrative.....	21
2. Climatologie	22
2.1. La Température.....	23
2.2. Les précipitations.....	25
2.3. Le vent	26
2.4. L'Humidité	28
2.5. L'Ensoleillement	29
3. Synthèse climatique.....	30
3.1. Le diagramme ombrothermique :	30
3.2. Etage bioclimatique (Climagramme d'Emberger) :	31
4. Géologie de la région d'étude	32
5- Pédologie de la région d'étude :	35
6. Hydrologie et ressources hydriques de la région d'étude	37
6.1. Ressources en eaux superficielles.....	37
6.2. Ressources en eaux souterraines.....	37
6.3. Enjeux hydriques locaux	38
7. Milieu socio-économique :	39
7.1. La population et l'habitat :	39
7.2. L'industrie :	40
7.3. L'agriculture :	41

Chapitre III: Matériel et méthodes

1- Présentation du site et méthodologie générale.....	44
2. Dispositif expérimental :	46
2.1. Préparation et traitement des échantillons :	47
2.2. Méthodes analytiques :	47
3. Travail expérimental :	49
3.1. Analyse du pH, de la CE, de la salinité et des TDS :	49
3.2. Dosage de la matière organique (MO) et du carbone organique (CO) :	49
3.3. Détermination du calcaire total :	50
3.4. Dosage du calcium et du magnésium :	50
4- Analyse des éléments par fluorescence X (XRF) :	55
4.1. Traitement statistique des données :	56

Chapitre IV: Résultats et discussion

I. Résultats	60
1. Les paramètres physico-chimiques du sol.....	60
1.1. Echantillons sans traitement (Témoins)	60
1.2. Echantillons traités par l'herbicide Gallant Super (TH).....	62
1.3. Echantillons traités par un fongicide (TF)leconsento.....	64
2- Les éléments chimiques toxique et éléments traces dans le sol de la zone d'étude.....	65
2. 1 Echantillons des éléments chimiques toxiques dans le sol (Oxydes majeurs et éléments traces (SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ , TiO ₂ , Cr ₂ O ₃ , Mn ₂ O ₃ , Cu) dans les sols de la zone d'étude.....	65
3. Les variations des paramètres physico-chimiques en fonction du traitement et de profondeur	66
3.1 Variation de PH	66
3.2 Salinité (CE, TDS).....	67
3.3 Matière organique (MO), carbone organique (CO) et rapport C/N.....	70
3.4 Éléments nutritifs majeurs (N, P, K) de sol.	72
3.4.1Azote total (N).	72
3.5. Les cations majeurs et calcaires (Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , CaCO ₃).....	75
3.5.1 Variation des cations majors (Ca ²⁺ , Mg ²⁺)	75
4 .Analyse statistique.....	77
4.1. Les corrélations linéaires entre les paramètres physico-chimiques.....	77
4.2. Analyse en Composantes Principales (ACP) des paramètres physico-chimiques des sols, projection de tous les paramètres sur les deux facteurs 1 et 2.....	78
4.3. Classification des types de sols par analyse ascendante hiérarchique (CAH).....	80
4.4. Effets du type de sol et de la profondeur sur les propriétés physico-chimiques.....	82
5. Comparaison des sols témoins et des sols traités par herbicide et fongicide	83
5.1. Comparaison des valeurs moyennes de pH entre les trois types de sols	84
5.2. comparaison des valeurs de MO entre les trois types de sols.....	85
5.3. Comparaison des valeurs moyennes de CO entre les types de sols.....	86
5.4. Comparaison des valeurs moyennes de Calcaire entre les trois types de sols.....	87
5.5. Comparaison des valeurs moyennes de Calcium entre les types de sols.....	88
5.6. Comparaison des valeurs moyennes de Magnésium entre les types de sols	88
5.7. Comparaison des valeurs moyennes d'Azote entre les types de sols	89
5.8. Comparaison des valeurs moyennes de phosphore entre les types de sols	90

II .Discussion.....	91
1. Effet des traitements sur les paramètres physico chimiques des sols.....	91
2. comparaison des parametres avec les normes d'afnor	99
3. Effet de la profondeur sur les paramètres physico-chimiques et minéraux du sol.....	101
4. Interactions traitements et profondeur sur les paramètres physico chimiques de sol	102
5. Évaluation des pratiques agricoles à Maâder Boussaâda : usages des pesticides et conséquences écologiques.....	103
Conclusion :.....	106
Références Bibliographiques :	110

Remerciement

Après des années de recherche scientifique, je souhaite profiter de ces quelques lignes pour exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à faire de cette expérience un souvenir inoubliable.

Tout d'abord, je tiens à adresser mes sincères remerciements à mon directeur de thèse, le Professeur Zouggaghe Fatah, pour la confiance qu'elle m'a accordée. Je lui suis reconnaissante pour la grande liberté qu'elle m'a laissée dans la réalisation de ce travail, tout en restant toujours disponible, à l'écoute et attentive au bon déroulement de cette thèse.

J'adresse également mes remerciements les plus respectueux aux membres du jury :

Madame Mouhoub-Sayah Chafika, Présidente du jury .

Madame Maizi , Naila, Monsieur Bounar rabah et Monsieur Missaoui Khaled, qui m'ont fait l'honneur d'évaluer ce travail et d'y participer en tant qu'examinateurs.

Ce travail de recherche n'a pu être mené à bien que grâce au soutien matériel et humain des laboratoires de l'Université Mohamed Boudiaf de M'sila, de l'Université Akli Mohand Oulhadj, ainsi que du laboratoire de Lafarj à M'sila.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance au Professeur Ben Saci pour son soutien constant depuis le début de mon parcours, tant pour la publication de l'article que pour l'aboutissement de cette thèse. Son aide précieuse restera gravée dans ma mémoire.

Mes remerciements vont également à Monsieur Cheriaf pour son aide lors de l'échantillonnage, ainsi qu'à Monsieur Messaguem Mouftah pour les analyses des échantillons de sol réalisées au laboratoire de Lafarj.

Je remercie également la Direction de l'Agriculture de la wilaya de M'sila, ainsi que l'ensemble des agriculteurs de la région de Maâder, en particulier le propriétaire du terrain sur lequel ont été réalisés les travaux de terrain.

J'adresse aussi mes remerciements à Monsieur Badis, représentant de la société Bayer, ainsi qu'à Monsieur Laidi Hocine pour la mise en forme de cette thèse.

Je remercie chaleureusement tous mes enseignants qui ont contribué à ma formation tout au long des trois cycles universitaires : licence, master et doctorat. L'obtention successive de ces diplômes représente l'aboutissement d'un long parcours académique riche en apprentissages et en expériences.

Enfin, mes pensées les plus sincères vont à ma mère, la perle de ma vie, ainsi qu'à mes frères et sœurs : Saif Eddine, Abd Raouf, Badis, Nour Al Yaqine et Acile. Leur amitié, leurs encouragements, leur soutien indéfectible, leurs conseils et leur amour m'ont permis de surmonter toutes les épreuves. Je remercie également ma belle-mère pour son soutien.

À l'âme de mon père, le Professeur Bakhti Ramadan, que Dieu lui accorde Sa miséricorde, ainsi qu'à mon cher grand-père Saad, que Dieu ait son âme, dont le rêve était d'assister à ma soutenance.

Je remercie également ma petite famille, mon cher mari Mohamed Ouali, pour son soutien infini et ses sacrifices, ainsi que mes filles Aya et Roueya pour leurs prières, leur patience et leur amour. Ils ont toujours été présents à mes côtés, même dans les moments les plus difficiles.

Si j'ai réussi aujourd'hui, c'est grâce à eux.

LISTE DES FIGURES

N°	Titre	Page
Figure 1	Répartition du marché mondial des pesticides par région du monde. Source : Observatoire des pesticides – www.observatoire-pesticides.fr	15
Figure 2	Utilisation, évaluation et impacts des pesticides en Algérie	17
Figure 3	Carte de localisation de la région [Carte réalisée par l'étudiante].	22
Figure 4	Températures maximales, minimales et moyennes mensuelles de la station de Boussaâda (période 1994- 2018).	24
Figure 5	Diagramme ombrothermique de la région de Boussaâda pour la période 1994-2018.	31
Figure 6	Carte géologique de la zone d'étude (d'après Flandrin, 1952).	34
Figure 7	Carte pédologique de la région d'El-Hodna (Boyadgfv, 1975).	36
Figure 8	Hydrologie du Bassin d'El-Hodna (ANRH, 1984).	39
Figure 9	Répartition des superficies agricoles (village Maâder, Boussaâda). (SAB, 2014)	42
Figure 10	Schéma récapitulatif du dispositif expérimental et des étapes analytiques en laboratoire.	47
Figure 11	Préparation des échantillons pour les analyses physico chimiques.	51
Figure 12	Appareils et préparations pour l'analyse du sol par pH-mètre et spectrométrie XRF	52
Figure 13	Variations du pH selon le traitement et la profondeur.	67
Figure 14	Variations de la salinité selon le traitement et la profondeur.	68
Figure 15	Variations de la TDS (taux des Seles minéraux) selon le traitement et la profondeur.	69
Figure 16	Variations de la CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$) selon le traitement et la profondeur.	70
Figure 17	Variations de la matière organique MO (%) selon le traitement et la profondeur.	71
Figure 18	Variations du carbone CO (%) selon le traitement et la profondeur.	71
Figure 19	Variations du rapport (C/N) selon le traitement et la profondeur.	72
Figure 20	Variations de l'azote selon le traitement et la profondeur.	73
Figure 21	Variations du phosphore selon le traitement et la profondeur.	74
Figure 22	Variations du Potassium selon le traitement et la profondeur.	74
Figure 23	Variations du Calcium selon le traitement et la profondeur.	75
Figure 24	Variations du Magnésium selon le traitement et la profondeur.	76
Figure 25	Variations du Calcaire total selon le traitement et la profondeur.	76
Figure 26	Analyse en Composantes Principales (ACP) des paramètres physico-chimiques des sols, projection de tous les paramètres sur les deux axes 1 et 2	79
Figure 27	Dendrogramme de la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) entre les groupes selon les types de sol	81
Figure 28	Projection de types de sols sur les deux facteurs 1 et 2.	81
Figure 29	Valeurs moyennes de pH dans trois types du sol.	84
Figure 30	Taux de Matière organiques dans les trois types du sol.	85

Figure 31	Taux de carbone organiques dans les trois types du sol.	86
Figure 32	Taux de calcaire dans trois types du sol.	87
Figure 33	Teneur en Ca ⁺ dans trois types du sol.	88
Figure 34	Teneur en Mg ⁺² dans trois types du sol.	89
Figure 35	Taux d'azote dans trois types du sol.	90
Figure 36	Taux d'azote dans trois types du sol.	91

LISTE DES TABLEAUX

N°	Titre	Page
Tableau 1	Historique de l'évolution des trois grandes familles des pesticides des années 1900 jusqu'aux années 2000.	7
Tableau 2	Liste indicative établie à partir des principaux produits phytosanitaires utilisés en Algérie.	16
Tableau 3	Températures maximales, minimales et moyennes mensuelles de la région d'étude (période 1994-2018).	17
Tableau 4	Précipitations moyennes mensuelles de la région d'étude (en mm) (période 1994-2018)	19
Tableau 5	Vitesse moyenne mensuelle et annuelle du vent de la région d'étude (période 1994-2018).	24
Tableau 6	Moyennes mensuelles de l'humidité relative (%) de la région d'étude pour la période (1994-2018).	25
Tableau 7	Durée moyenne mensuelle d'ensoleillement (h) de la zone d'étude durant la période (1994-2018).	27
Tableau 8	Évolution de la population de Boussaâda au cours des différents recensements entre 1966 et 2008.	28
Tableau 9	Propriétés et fonctions des principaux éléments détectés par la méthode XRF dans les sols agricoles.	29
Tableau 10	Fiche technique de l'herbicide : Gallant super.	40
Tableau 11	Fiche technique de fongicide : Consentio.	53
Tableau 12	Pesticides les plus couramment commercialisés et utilisés par les ouvriers agricoles et leurs classes toxicologiques.	54
Tableau 13	Résultats des paramètres physico-chimiques du sol non traités dans les différentes profondeurs.	61
Tableau 14	Résultats des paramètres physico-chimiques du sol traité par l'herbicide (TH) dans les différentes profondeurs.	63
Tableau 15	Résultats des paramètres physico-chimiques du sol traité par le fongicide (TF) dans les différentes profondeurs.	64
Tableau 16	Les éléments chimiques toxiques dans les sols de la zone d'étude.	66
Tableau 17	Matrice des corrélations des paramètres physico-chimiques des sols (n= 3).	77
Tableau 18	ANOVA à deux facteurs, Pvalues des effets sol, profondeur et sol × profondeur sur les paramètres physico-chimiques.	83
Tableau 19	Comparatif des paramètres physico-chimiques du sol.	100
Tableau 20	Déclin de la biodiversité locale selon les enquêtes agriculteurs auprès de la zone Maâder Boussaâda.	103

L'objectif central de cette étude réside dans le suivi et l'évaluation de l'influence des pesticides sur la qualité physico-chimique des sols cultivables de Maâdar Boussaâda, dans la wilaya de M'sila. Ce territoire à caractère maraîcher est caractérisé par des conditions semi-arides, une pluviométrie limitée et une concentration réduite en matière organique. Le travail a porté sur deux produits phytosanitaires : un herbicide destiné afin de maîtriser l'enherbement et d'appliquer un fongicide pour prévenir les attaques fongiques. Les analyses ont été réalisées sur trois horizons du profil pédologique P1 (0 – 20cm), P2 (20 – 40cm) (et P3 (40 – 60cm), avec l'analyse de plusieurs paramètres (pH, salinité, TDS, CE, matière organique, carbone organique, éléments nutritifs, cations majeurs et oxydes chimiques).

Les résultats obtenus montrent que l'utilisation des pesticides modifie sensiblement les propriétés physico-chimiques du sol. Sous herbicide, le pH du sol observe une légère alcalinisation (8.40 pour le témoin (qui augmente légèrement sous l'effet de traitement par l'herbicide (8.86) et le fongicide (8.98). Une augmentation de la conductivité électrique (381.1 $\mu\text{S/cm}$) sous l'utilisation d'herbicide et une accumulation des sels solubles (284.4 mg/L), alors que les sols traités au fongicide présentent des valeurs plus faibles (243,9 $\mu\text{S/cm}$ et 166,2 mg/L). La matière organique et le carbone organique augmentent sous herbicide (3,02% et 1,76 %), traduisant une décomposition plus lente, en revanche sous le fongicide ces paramètres diminuent (1,06% et 0,62%) en raison d'une minéralisation accélérée ; le rapport C/N inférieur aux valeurs des témoins (1.42% pour TH et 1.4% pour TF). Concernant les éléments nutritifs, l'azote total augmente sous le Gallant super (1,28%) et sous le Consento (0,641%), tandis que la teneur en azote était faible dans le témoin (0,23%). Le phosphore disponible augmente sous herbicide (2,00%) mais diminue fortement sous fongicide (0,56%) le potassium subit de légères variations avec légère baisse sous le fongicide (0,53%). Le calcium (3,92%), le magnésium (0,16%) et le calcaire total (6,33%) augmentent légèrement sous l'herbicide contribuant à la stabilité structurale tout en modulant la disponibilité des nutriments comparativement au témoin. Par ailleurs, certains métaux lourds (Cr, Mn, Cu) s'accumulent dans les horizons superficiels, ce qui pourrait affecter la biodiversité microbienne et la qualité des eaux.

Comparées aux normes FAO/AFNOR, les valeurs de pH et de CE dépassent légèrement les seuils recommandés, tandis que le rapport C/N demeure faible.

Abstract:

The main objective of this study is to monitor and evaluate the effects of pesticides on the physicochemical quality of agricultural soil in MaâdarBoussaâda, wilaya of M'sila. This region, primarily dedicated to market gardening, is characterized by a semi-arid climate, low and irregular rainfall, and reduced organic matter content. The study focused on two phytosanitary products: an herbicide targeting weeds and a fungicide used against fungal diseases. Analyses were conducted on three soil profile horizons P1 (0-20 cm), P2 (20-40 cm), P3 (40-60 cm) covering parameters such as pH, salinity, TDS, EC, organic matter, organic carbon, nutrients, major cations, and chemical oxides.

The results demonstrate that pesticide use significantly alters soil physicochemical properties. Under herbicide treatment (TH), soil pH shows slight alkalization, increasing from 8.40 (control) to 8.86 (TH) and 8.98 (TF). Electrical conductivity (EC) rises to 381.1 $\mu\text{S}/\text{cm}$ under herbicide influence, with soluble salts accumulating at 284.4 mg/L, while fungicide-treated soils show lower values (243.9 $\mu\text{S}/\text{cm}$ and 166.2 mg/L). Organic matter (OM) and organic carbon (OC) increase under herbicide (3.017% and 1.761%, respectively), indicating slower decomposition. Conversely, under fungicide, these parameters decrease sharply (1.057% and 0.615%) due to accelerated mineralization, with C/N ratios lower than controls (1.424% for TH and 1.399% for TF).

Regarding nutrients, total nitrogen increases under Gallant Super (1.283%) and Consentio (0.641%), compared to low levels in controls (0.23%). Available phosphorus rises under herbicide (2.002%) but drops sharply under fungicide (0.515%), while potassium shows slight variations with a minor decrease under fungicide (0.527%). Calcium (3.924%), magnesium (0.161%), and total lime (6.331%) increase slightly under herbicide, contributing to structural stability while modulating nutrient availability. Compared to controls, certain heavy metals (Cr, Mn, Cu) accumulate in surface horizons, potentially affecting microbial biodiversity and water quality.

When compared to FAO/AFNOR standards, pH and EC values slightly exceed recommended thresholds, while the C/N ratio remains low. Farmer surveys reveal non-rational and intensive pesticide use, promoting salinization and progressive fertility decline.

This study emphasizes that reasoned and controlled pesticide use is essential to preserve soil fertility and sustainability in semi-arid agricultural areas like MaâdarBoussaâda.

يتمثل الهدف الرئيسي من هذه الدراسة في تتبّع وتقييم تأثير المبيدات على الجودة الفيزيائية-الكيميائية للتربة الزراعية وتتميّز هذه المنطقة ذات الطابع الخصري بظروف شبه جافة، وقلة التساقطات المطرية، وانخفاض محتوى المادة بالمعذر العضوية. شملت الدراسة استعمال منتجين من المبيدات الزراعي مبيد أعشاب للتحكم في الغطاء العشبي، ومبيد فطري للوقاية من الإصابات الفطرية

أُجريت التحاليل على ثلاثة آفاق من المقطع الترابي

(pH سم)، مع دراسة عدة معلمات، منها: الأس الهيدروجيني (P3 (40–60 سم) و P2 (20–40 سم)، P1 (0–20 سم) المادة العضوية، الكربون العضوي، العناصر (CE)، التوصيلية الكهربائية (TDS) الملوحة، المواد الصلبة الذائبة الكلية الغذائية، الكاتيونات الرئيسية، والأكاسيد الكيميائية

أظهرت النتائج أن استعمال المبيدات يؤدي إلى تغيّرات ملحوظة في الخصائص الفيزيائية-الكيميائية للتربة. فوجود مبيد التربة، حيث بلغ 8.40 في الشاهد، وارتفع إلى 8.86 تحت تأثير مبيد الأعشاب pH الأعشاب، لوحظت قلوية طفيفة في وإلى 8.98 تحت تأثير المبيد الفطري. كما سُجّلت زيادة في التوصيلية الكهربائية (381.1 ميكروسيمنز/سم) وتراكم للأملاح الذائبة (284.4 ملغ/لتر) في الترب المعالجة بمبيد الأعشاب، في حين أظهرت الترب المعالجة بالمبيد الفطري قيماً أقل (243.9 ميكروسيمنز/سم و 166.2 ملغ/لتر

ازدادت نسبة المادة العضوية والكربون العضوي تحت تأثير مبيد الأعشاب (3.02% و 1.76%)، ما يدل على بطء عملية التحلل، في المقابل انخفضت هذه القيم في حالة المبيد الفطري (1.06% و 0.62%) نتيجة تسارع عملية التمعدن. كما كان أقل من قيم الشاهد 1.42% لمبيد الأعشاب و 1.4% للمبيد الفطري C/N معدل

وتحت تأثير Gallant Super (1.28%) وبخصوص العناصر الغذائية، ارتفعت نسبة الأزوت الكلي تحت تأثير مبيد بينما كانت منخفضة في الشاهد (0.23%). كما ارتفع الفوسفور المتاح تحت تأثير مبيد الأعشاب (0.641% Consento (2.00%) وانخفض بشكل ملحوظ تحت تأثير المبيد الفطري (0.56%)، في حين عرف البوتاسيوم تغيرات طفيفة مع انخفاض بسيط تحت المبيد الفطري.

وسُجّلت زيادة طفيفة في الكالسيوم (3.92%)، والمغنيسيوم (0.16%)، والكلس الكلي (6.33%) تحت تأثير مبيد الأعشاب، ما يساهم في استقرار البنية الترابية وتنظيم توفر العناصر الغذائية مقارنة بالشاهد. من جهة أخرى، لوحظ تراكم بعض المعادن الثقيلة (الكروم، المنغنيز، النحاس) في الآفاق السطحية، الأمر الذي قد يؤثر على التنوع الميكروبي وجودة المياه

والتوصيلية الكهربائية تتجاوز قليلاً الحدود الموصى بها، في pH ، تبين أن قيم FAO/AFNOR وبالمقارنة مع معايير منخفضاً C/N حين ظل معدل

INTRODUCTION

Introduction

Au fil du temps, en raison de la croissance rapide de la population, la demande alimentaire a augmenté (Agrimonde, 2009). L'agriculture est le secteur clé pour assurer la sécurité alimentaire (Chebbi et *al.*, 2004). Dans les régions semi-arides de l'Algérie, le secteur de l'agriculture se caractérise par des défis considérables en raison des conditions climatiques difficiles, incluant des apports pluviométriques faibles et irréguliers, des niveaux d'évaporation importants et des sols caractérisés par une faible teneur en matière organique et en nutriments. Ces régions, qui couvrent une grande partie du territoire algérien, nécessitent des stratégies spécifiques pour garantir une production agricole viable (Adair et *al.*, 2022). Les agriculteurs de ces zones adoptent diverses techniques pour s'adapter aux conditions arides, telles que l'irrigation goutte à goutte, l'utilisation de cultures résistantes à la sécheresse et l'application d'engrais et d'amendements pour améliorer la qualité des sols (Aktar, 2009). Cependant, l'utilisation accrue de pesticides et d'engrais chimiques soulève des questions quant à la durabilité à long terme de ces pratiques, notamment en ce portant sur l'altération des sols ainsi que sur la pollution des eaux.

Malgré ces défis, l'agriculture dans les régions semi-arides de l'Algérie joue un rôle important dans l'économie locale, fournissant des emplois et contribuant à la sécurité alimentaire. Des efforts pour améliorer les techniques agricoles, préserver les ressources naturelles et promouvoir des pratiques durables sont essentiels pour assurer la résilience de l'agriculture dans ces zones vulnérables (Lakhdari et *al.*, 2019). Face à cette situation, l'usage des produits phytosanitaires s'est imposé comme solution rapide et accessible. L'état et les agriculteurs s'efforcent d'améliorer et de développer des pratiques agricoles visant à résoudre les problèmes liés aux ravageurs agricoles qui endommagent les cultures (Alain et *al.*, 2014).

L'utilisation des pesticides n'est pas une pratique récente. Dès l'Antiquité, les agriculteurs égyptiens et sumériens utilisaient du soufre ou des extraits de plantes pour protéger les récoltes. Cependant, c'est à partir du XIX^e siècle que l'emploi de substances chimiques minérales (comme l'arséniate de plomb ou le sulfate de cuivre dans la bouillie bordelaise) s'est généralisé en Europe. Le véritable tournant s'opère au XX^e siècle avec la découverte du DDT (dichlorodiphényltrichloroéthane) dans les années 1930, qui a révolutionné la lutte contre les insectes, notamment pendant la seconde guerre mondiale pour le contrôle du paludisme et du typhus. L'après-guerre marque l'essor industriel des pesticides de synthèse, avec une diffusion mondiale qui accompagne la « Révolution verte » des années 1960. Celle-ci, en introduisant variétés à haut rendement, engrais chimiques et pesticides, a

permis d'accroître significativement la production alimentaire mondiale, mais au prix d'une dépendance croissante aux intrants chimiques (Boland et *al.*, 2014).

Les pesticides sont des compositions chimiques toxiques destinées au contrôle et à l'élimination des êtres vivants dommageables, incluant bactéries, herbes indésirables, champignons, insectes, mollusques et rongeurs (Ben Mahdi, 2008). Les produits phytosanitaires sont spécifiques à chaque type de ravageur ciblé (Boland, 2004). Les produits phytosanitaires se divisent en divers types, dont les herbicides pour l'éradication des mauvaises herbes en céréaliculture et maraîchage, les insecticides pour la sécurité des vergers et cultures industrielles, et les fongicides contre les maladies Fongiques. Il est important de noter que certains pesticides contiennent des éléments traces métalliques ou des substances pouvant évoluer en métaux lourds. Ces constituants chimiques se distinguent par une masse volumique élevée, excédant 5 g/cm³ (Traore, 2007).

Des métaux lourds comme le cadmium, le cuivre et le plomb, trouvés dans le sel alimentaire, manifestent une toxicité significative pour l'homme et la faune, même à de faibles doses. Issus de sources naturelles ou d'activités humaines (mines, industrie, agriculture), ces contaminants nuisent aux écosystèmes en polluant de manière persistante les sols, l'eau et l'atmosphère (Chiou, 1986).

À l'échelle planétaire, le recours aux pesticides agricoles est une question centrale aux multiples facettes. Créés pour optimiser la productivité et la qualité sanitaire, ces substances font toutefois l'objet de critiques croissantes. Selon la FAO, les pertes de récoltes dues aux ravageurs et maladies atteignent 40 % par an. Par conséquent, ces traitements ont été adoptés pour sécuriser les rendements agricoles et prévenir les déficits de production ou de conservation. Les pratiques d'application diffèrent suivant les régulations en vigueur dans chaque pays. Il est alarmant de constater que l'efficacité de leur usage ne dépasse pas 20 %, le reste étant dispersé de manière incontrôlée, ce qui nuit à la santé publique et à l'environnement. (Batch, 2011).

Aujourd'hui, l'Algérie, parmi de nombreux pays en développement, s'inscrit dans ce modèle productiviste hérité, où l'usage intensif des pesticides reste perçu comme indispensable pour sécuriser les récoltes. L'utilisation des pesticides en Algérie est une pratique courante en agriculture, l'Algérie est un grand consommateur de pesticides. En Algérie, divers travaux ont visé à mesurer l'incidence des pesticides sur la qualité édaphique. Cette approche intègre les piliers de la définition actuelle de la qualité des sols, à savoir la fertilité, la productivité, la durabilité et la qualité de l'environnement. L'évaluation repose ainsi sur les différentes propriétés du sol qui agissent comme indicateurs (Shiva, 1991).

L'application intensive de pesticides agricoles est à l'origine de major problèmes pour la santé et l'environnement, incluant la pollution hydrique et édaphique, le déclin de la biodiversité, la modification des qualités du sol, ainsi que les risques d'intoxication, de maladies durables et de contamination des denrées (FAO/OMS, 2016 ; OMS, 2019). Les liens étroits que le sol tisse avec les écosystèmes terrestres en font un pivot essentiel des dynamiques écologiques.

L'objectif principal de notre travail est de suivre et d'évaluer l'effet de deux produits phytosanitaires, un herbicide (Gallant Super), utilisé contre les mauvaises herbes, et un fongicide (Consento), destiné au contrôle des pathologies fongiques et ses effets sur la fertilité des terres agricoles. Il consiste à analyser les variations des paramètres physico-chimiques des sols (pH, matière organique, azote, phosphore, métaux lourds... etc.) avant et après application de pesticides, en vue d'évaluer leurs répercussions immédiates et différées sur la fertilité du sol et la production agricole. Les résultats offriront des repères cruciaux pour la conservation des sols et l'atténuation des risques liés aux intrants chimiques dans cette région au climat semi-aride. Parallèlement à l'examen scientifique, nous avons interrogé les agriculteurs et la population locale sur la disparition de la biodiversité, ce qui met en évidence l'empreinte écologique de l'application continue de pesticides.

Avant la mise en place du protocole expérimental et la phase d'échantillonnage, la présente étude s'inscrit dans un contexte agricole caractérisé par la pauvreté minérale des sols de la région de Maâder Boussaâda. Face à ces contraintes édaphiques, les agriculteurs ont recours à une utilisation des pesticides afin de limiter les fléaux et d'améliorer les rendements agricoles. L'hypothèse centrale affirme que les pesticides intensivement appliqués à Maâder Boussaâda altèrent les sols pauvres en minéraux (propriétés physico-chimiques), générant une productivité contrastée : bénéfices courts termes, dégradation de fertilité à long terme.

Le présent travail est structuré en quatre chapitres complémentaires qui s'articulent de manière progressive afin d'assurer une analyse cohérente et approfondie de la problématique étudiée.

- Le premier chapitre constitue une revue bibliographique détaillée consacrée aux pesticides. Il retrace leur historique, définit leurs différentes familles chimiques et fonctionnelles, précise leurs modes d'action et leurs usages en agriculture moderne. Ce chapitre examine également les conséquences éventuelles des traitements phytosanitaires sur les milieux naturels (terre, eau, atmosphère, faune et flore) ainsi que sur la santé humaine, en s'appuyant sur des études nationales et internationales récentes. Cette synthèse bibliographique permet de situer l'étude dans son contexte scientifique et de cerner les enjeux liés à l'utilisation des pesticides en milieu agricole.

- Le deuxième chapitre se base sur la présentation de la zone d'étude. Il décrit les principales caractéristiques climatiques (températures, précipitations, régime hydrique), pédologiques (nature des sols, texture, structure, teneur en matière organique, difficultés de fertilité) et les paramètres agricoles (types de cultures, lutte chimique) de la région de Maâder Boussaâda (wilaya de M'Sila). Ce chapitre est essentiel pour comprendre le cadre environnemental dans lequel se déroule l'expérimentation et pour identifier les facteurs locaux susceptibles d'influencer le comportement des pesticides et leurs effets sur la qualité du sol.
- Le troisième chapitre décrit le matériel ainsi que la méthodologie employée. Il détaille le protocole expérimental établi (choix des parcelles, nature des traitements appliqués, modalités d'échantillonnage du sol), ainsi que les techniques analytiques employées pour évaluer les propriétés physico-chimiques, minérales et les éléments traces. Les méthodes statistiques utilisées pour l'interprétation des données (analyses de variance, tests de comparaisons) sont également détaillées.
- Le quatrième chapitre regroupe l'ensemble des résultats expérimentaux et leur discussion. Les données obtenues sont présentées sous forme de tableaux et de graphiques, puis analysées en fonction des traitements (témoin, herbicide, fongicide) et aussi en fonction des profondeurs du sol. Les résultats sont interprétés en tenant compte du contexte pédoclimatique local et confrontés aux travaux antérieurs réalisés en Algérie et ailleurs. Cette partie met en lumière les répercussions des traitements chimiques sur la qualité physico-chimique et la fertilité des terres, offrant une base pour des conclusions rigoureuses et des conseils visant une gestion durable des intrants en milieu semi-aride.

CHAPITRE I:
SYNTHÈSE BIBLIOG
RAPHIQUE

1- Historique des pesticides

Les pesticides se définissent comme des préparations chimiques toxiques servant à la lutte contre les nuisibles et les affections provoquées par des micro-organismes (Boland et *al.*, 2014). Au cours des siècles, le développement de l'agriculture et la domestication des espèces augmente en parallèle avec l'augmentation de la densité humaine (Malassis, 1988).

Les agricultures utilisent les produits phytosanitaires pour réduire les dégâts et les dommages causés par les organismes nuisibles (Letendre et *al.*, 2004). La découverte et l'utilisation des pesticides passent par des étapes au cours du temps.

1.1. Les premières utilisations dans l'Antiquité

L'usage des pesticides remonte à l'antiquité. Dès 1000 av. J.-C., les Grecs utilisaient le soufre comme fongicide (Aubertot et *al.*, 2005), tandis que les Romains, l'arsonic est recommandé par Pline, naturaliste romain, pour l'utiliser pour combattre les insectes nuisibles (Boland et *al.*, 2014). Certaines plantes connues pour leurs propriétés toxiques (comme l'aconit), étaient aussi utilisées pour éloigner les rongeurs.

Entre les années 1500 et 1800, les agriculteurs chinois et européens utilisaient des produits à base d'arsenic et de plomb. En Inde, les propriétés insecticides du tabac étaient déjà exploitées. Des plantes comme Derris et lonchocarpus, sont deux genres botaniques bien connus pour leur contenu naturel en roténone, une substance insecticide d'origine végétale, étaient également employées (Batsch, 2011).

1.2. Le développement de la chimie minérale (XIX^{ème} siècle)

Le XIX^{ème} siècle a représenté une avancée significative avec l'évolution de la chimie minérale, favorisant la prolifération des composés à base de sels métalliques. Parmi eux, la bouillie bordelaise (mélange de chaux et de sulfate de cuivre) reste l'exemple emblématique pour traiter le mildiou sur les vignes et les cultures de pommes de terre (Boland et *al.*, 2014).

En 1874, le chimiste Othmar Zeidler synthétisa pour la première fois le dichlorodiphényltrichloroéthane (DDT), bien que ses propriétés insecticides ne soient découvertes qu'en 1939.

1.3. Le développement de la chimie organique au cours du XX^{ème} siècle

Au début du XX^{ème} siècle, les sels de mercure furent utilisés pour le traitement des semences. En 1924, les extraits de pyrèthre, un insecticide naturel dérivé de plantes comme le chrysanthème, furent mis sur le marché (Batsch, 2012).

Durant les années 1930, les grandes firmes chimiques telles que BASF et BAYER commencèrent à produire en masse des pesticides de synthèse. En 1935, la classe des carbamates fut découverte, suivie, en 1939, par la reconnaissance des propriétés insecticides

du DDT, qui marqua un tournant majeur dans la lutte contre les vecteurs de maladies humaines, comme le paludisme (Boland et *al.*, 2014).

1.4 Période d'après-guerre et industrialisation massive

Durant la seconde guerre mondiale (1939–1945), les organophosphorés, d'abord développés à des fins militaires, furent adaptés pour un usage agricole en raison de leur grande efficacité. Leur utilisation a permis d'augmenter les rendements agricoles de manière spectaculaire, ce qui a entraîné leur adoption massive après-guerre, notamment aux États-Unis et en Europe (Batsch, 2012).

Cette période a vu un fort développement de nouvelles familles de pesticides :

- Herbicides (uréessubstituées),
- Fongicides (benzimidazoles, triazoles),
- Insecticides puissants, mais persistants et souvent toxiques.

1.5. Prises de conscience et réglementations (1960 – aujourd'hui)

En 1962, la biologiste américaine Rachel Carson publia son livre célèbre *Silent Spring* (*Printemps silencieux*), qui dénonçait les effets destructeurs des pesticides modernes sur la biodiversité, la santé humaine et l'environnement. Cet ouvrage a profondément influencé l'opinion publique et les politiques de régulation dans les décennies suivantes (Carson, 1962). Les décennies 1970-1980 ont été marquées par l'avènement des pyréthrinoides, une catégorie d'insecticides qui s'est imposée sur le marché grâce à sa faible rémanence et sa plus grande sélectivité (Boland et *al.*, 2014).

Enfin, la fin du XX^{ème} siècle a vu le développement de bio-pesticides, ou pesticides d'origine biologique, à base de microorganismes, d'extraits végétaux ou d'agents naturels stimulant les défenses des plantes. Cette approche, plus respectueuse de l'environnement, est aujourd'hui encouragée dans le cadre de l'agriculture durable (Batsch, 2012 ; OMS, 2019).

Tableau 1: Historique de l'évolution des trois grandes familles des pesticides des années 1900 jusqu'aux années 2000(d'après El Mrabet, 2008).

	HERBICIDES	FONGICIDES	INSECTICIDES
Avant 1900	Sulfate de cuivre Sulfate de fer	Soufre Sels de cuivre	Nicotine
1900 - 1920	Acide sulfurique		Sels d'Arsenic
1920 - 1940	Colorants nitrés		
1940 - 1950	Phytohormones...		Organo-chlorés Organo-phosphorés
1950 - 1960	Triazines, Urées substituées Carbamates	Dithiocarbamates Phthalimides	Carbamates
1960 - 1970	Bipyridyles, Toluidines...	Benzimidazoles	
1970 - 1980	Amino-phosphonates Propionates...	Triazoles Dicarboximides Amides, Phosphites Morpholines	Pyréthrinoides Benzoylurées (régulateurs de croissance)
1980 - 1990	Sulfonylurées...		
1990 - 2000		Phénylpyrroles Strobilurines	Néonicotinoïdes

Le tableau ci-dessus présente l'évolution historique des principales familles de pesticides (herbicides, fongicides, insecticides) depuis avant 1900 jusqu'aux années 2000. La période post-2000 ne correspond pas à l'émergence de nouvelles grandes familles chimiques, mais correspond à une ère d'amélioration des composés chimiques, visant une sélectivité accrue et une réduction des quantités épandues, avec un recours grandissant aux biopesticides et à la gestion intégrée.

On observe une augmentation progressive des substances actives utilisées dans la lutte phytosanitaire contre les organismes nuisibles. Par exemple, les insecticides utilisés avant 1900 se limitaient à des substances naturelles comme la nicotine, tandis qu'à partir des années 1940 apparaissent les organo-chlorés et les organo-phosphorés, plus puissants mais également plus toxiques.

Du côté des herbicides, l'évolution commence avec des composés simples comme le sulfate de cuivre. Durant les années 1980-2000 on est passé à des substances plus ciblées, comme les sulfonylurées et les inhibiteurs enzymatiques.

Alors que pour les fongicides, on passe du soufre à des molécules de synthèse sophistiquées telles que les strobilurines et les triazoles, témoignant des avancées de la chimie moderne. Donc, suivant ce tableau (Tab. 01), on voit clairement l'augmentation du nombre de molécules chimiques utilisées, leur spécialisation, et le passage progressif de substances naturelles vers des composés de synthèse à large spectre.

2- Définitions

2.1. Les Pesticides

Les pesticides sont l'ensemble des substances et des produits chimiques dont les propriétés toxiques, ils sont utilisés pour attaquer, pour l'élimination des organismes indésirables et des fléaux qui nuisent à l'environnement et à la santé humaine, incluant les mauvaises herbes, les champignons, les insectes, les larves, les mollusques et les rongeurs. On les utilise pour la production que pour la protection des stocks agricoles. Ces agents chimiques neutralisent les menaces par contact direct ou injection tout au long du développement de la plante (Dahmani et *al.*, 2020).

Il existe une spécificité des traitements phytosanitaires vis-à-vis des ravageurs ciblés, tels que les insecticides pour les insectes, les herbicides pour les mauvaises herbes ou les fongicides pour les champignons (Périquet et *al.*, 2014). Ces substances se répartissent en deux groupes distincts suivant leur usage:

- Pesticides à usage agricole : ce sont les produits phytosanitaires utilisés pour lutter contre les ravageurs de cultures en milieu agricole.
- Pesticides à usage non agricole : ce sont les produits biocides qui sont utilisés dans le milieu non agricole, pour combattre les agents pathogènes dans la conservation du bois, en milieu hospitalier et d'autres usages domestiques (Bonnefoy, 2013).

Le Code international de conduite pour la distribution et l'utilisation des pesticides définit un pesticide comme tout produit ou mélange conçu pour combattre, détruire ou éloigner les ravageurs, incluant les vecteurs de maladies et les espèces (animales ou végétales) portant préjudice. Sont également concernés les agents utilisés pour prévenir ou éradiquer les organismes jugés dommageables, tels que les plantes, animaux, champignons ou bactéries (FAO, 2013).

Sont aussi incluses les substances agissant comme régulateurs de croissance, agents d'éclaircissage ou prévenant la chute précoce des fruits, de même que les traitements pré et post-récolte destinés à protéger les produits contre toute dégradation lors de l'entreposage et du transport.

2.2. Les adjuvants

La matière de produit phytosanitaire ne pas être composée toute seule, elle se nécessite plus des ingrédients ou les adjuvants pour une utilisation pratique et efficace. Donc, les adjuvants sont des matières utiliser avec les matières actives inclus dans les compositions d'un pesticide, ils sont utilisés pour améliorer l'efficacité des propriétés chimiques, ainsi que la persistance du produit sur l'organisme nuisible (les mauvaise herbes, les champignons). Ils sont considérées aussi comme des substances dépourvues d'activité biologiques, mais pouvant modifier les caractéristiques de pesticides. Ils se divisent en deux formes : poudre ou liquide (Bernard et Mercur, 2008).

2.3. Les ravageurs

On définit les ravageurs comme des organismes nuisibles ou fléaux agricoles attaquant les plantations. Ces menaces naturelles, incluant mauvaises herbes, champignons, mollusques et insectes, entraînent des effets néfastes comme l'apparition de taches sur les feuilles ou la concurrence pour les ressources vitales (eau, lumière, sels minéraux). (Durand, 2012).

3- Classification des pesticides

Les pesticides sont classés sur la base de plusieurs critères (usage, composition... etc.)

3.1. Les insecticides

Constituant la classe de produits phytosanitaires la plus utilisée, ils visent à combattre les insectes et leurs larves, ainsi que les tiques, acariens, araignées et pucerons. Ces substances se regroupent en familles chimiques et selon leur mécanisme d'action, incluant les organophosphorés (OP), les organochlorés (OC), les carbamates et les pyréthrinoides de synthèse (Louat, 2013).

3.1.1. Les organochlorés

Les organochlorés sont des molécules insecticides formées de chlore, de carbone et d'hydrogène. En raison de leur insolubilité et de leur résistance chimique, ces substances persistent durablement dans les écosystèmes. Leurs effets toxiques aigus sont moindres comparés à d'autres produits, mais leur capacité à s'accumuler engendre des impacts écotoxicologiques majeurs (Aligon et al., 2018). Des substances comme le DDT, le métolachlore, le pentachlorophénol et le perméthrine appartiennent à cette catégorie.

Le DDT (dichloro-diphényl-trichloréthane) est un composé organochloré persistant, dont la demi-vie dans le sol peut atteindre jusqu'à 12 ans. Il a été synthétisé pour la première fois par le chimiste autrichien Othmar Zeidler en 1874. Cependant, ce n'est qu'en 1939 que ses propriétés insecticides ont été découvertes par le chimiste suisse Paul Hermann Müller, qui reçut le prix Nobel de physiologie ou médecine en 1948 pour cette découverte. Le DDT a

été largement utilisé à partir des années 1940 dans la lutte contre le paludisme et a joué un rôle important en agriculture (Encyclopaedia Britannica, 2023).

3.1.2. Les organophosphorés

Composés synthétiques à base de phosphore, les organophosphorés fonctionnent par inhibition du cholinestérase, perturbant ainsi le système nerveux. Particulièrement dangereux pour les mammifères du fait de leur caractère liposoluble, ces insecticides constituent une famille très variée. Ils peuvent agir par contact ou être véhiculés à l'intérieur de la plante. Leurs voies de pénétration incluent le contact cutané, la digestion et l'inhalation (Aligon et al., 2018). Ils sont classés en trois groupes principaux (Périquet, 2013) :

- Le groupe des organophosphorés aliphatiques.
- Les dérivés du phényle, qui représentent les aromatiques les plus stables.
- Les dérivés hétérocycliques.

3.1.3. Les carbamates

La famille des carbamates regroupe des insecticides issus de la chimie de l'acide carbamique. Ces composés neurotoxiques agissent en bloquant le cholinestérase, essentielle au bon fonctionnement de la transmission synaptique. On y retrouve notamment le carbofuran, le pirimicarbe, le carbaryl et le méthiocarbe.

La nature chimique des carbamates favorise leur décomposition rapide, limitant ainsi leur durée de vie dans les écosystèmes (Van Dyk et Pletschke, 2011).

3.1.4. Les pyrèthrinoïdes de synthèse

Ces composés synthétiques se distinguent par leur haute performance insecticide sur les cibles visées (WHO, 2005), et ont une faible toxicité pour l'homme et les animaux, et peu persistants dans l'environnement. Ils sont des molécules neurotoxiques ; Ils bloquent l'influx nerveux en perturbant le fonctionnement des canaux sodiques. Ce sont également des copies synthétiques des molécules insecticides que l'on trouve dans les pyrèthres, des plantes dotées de propriétés insecticides. Parmi les pyrèthrinoïdes de synthèse, on peut citer la bioesmethrine, la fenprothrine, la tralaméthrine, la permethrine qui ont une compositions insecticide et parasiticide (Aligon et Bonneau et al., 2010).D'autre part, en fonction de leur mécanisme d'action, on identifie les insecticides de contact, les systémiques ainsi que les insecticides translaminaires.

3.2. Les herbicides

1- Classification des herbicides selon les processus physiologiques ciblés dans la plante

Les herbicides sont classés selon leur mode d'action spécifique qui perturbe un processus physiologique vital chez les mauvaises herbes, entraînant leur mort tout en minimisant l'impact sur les cultures.

- **Herbicides perturbant la photosynthèse:** Ces produits empêchent la plante d'utiliser la lumière du soleil pour fabriquer son énergie, ce qui entraîne un déficit énergétique et la mort rapide de l'adventice. Exemple : les triazines.
- **Herbicides altérant la perméabilité des membranes cellulaires:** Ils endommagent les membranes des cellules végétales, provoquant leur rupture et le dysfonctionnement cellulaire. Exemple : paraquat.
- **Herbicides inhibant la croissance cellulaire:** Ils bloquent la division cellulaire et/ou la synthèse de la cellulose, inhibant de ce fait la division et l'allongement des cellules, provoquant l'arrêt du développement végétal.
- **Herbicides inhibant la synthèse des lipides:** ces herbicides privent la plante des acides gras indispensables à ses membranes, ce qui déstabilise la structure cellulaire et en bloque le fonctionnement.
- **Herbicides inhibant la synthèse des acides aminés:** En entravant la biosynthèse d'acides aminés essentiels aux protéines, ils compromettent l'équilibre métabolique et stoppent la croissance de la culture.
- **Herbicides inhibant la synthèse des pigments:** Ces herbicides empêchent la production de pigments indispensables, tels que la chlorophylle, ce qui empêche la photosynthèse et provoque la décoloration puis la mort des plantes.

Cette classification permet de choisir le type d'herbicide adapté à la cible à contrôler, tout en limitant les effets négatifs sur la culture.

2 – Herbicides agissant sur les feuilles

- Les inhibiteurs de la photosynthèse agissent en interrompant le transport des électrons dans les chloroplastes, ce qui inhibe la production d'énergie. Le processus normal, où la lumière absorbée par la chlorophylle permet le transfert d'électrons et la synthèse d'ATP, est ainsi bloqué.
- En inhibant la formation de la cellulose et des matières pecto-cellulosiques, ces produits privent la plante des matériaux nécessaires à sa paroi cellulaire. Cette

déficiences structurelles rend impossible le développement végétal ainsi que le transport et l'assimilation des ressources nutritives indispensables à la survie.

3- Herbicides à pénétration racinaire

- Cette catégorie d'herbicides cible la formation des pigments essentiels (caroténoïdes et chlorophylle) nécessaires à l'absorption et au transfert de l'énergie lumineuse. L'interruption de la biosynthèse des caroténoïdes à différentes étapes de la voie de formation de la chlorophylle entraîne une défaillance irrémédiable du processus de photosynthèse
- L'action de ces herbicides cible spécifiquement la mitose : ils interfèrent avec la ségrégation des chromosomes, empêchant leur migration et stoppant ainsi la multiplication cellulaire.
- Parmi les inhibiteurs de la synthèse des acides aminés aromatiques figurent le glyphosate. Cet herbicide systémique est utilisé en traitement de post-levée sur les adventices annuelles, bisannuelles et certaines espèces pérennes (Batsch, 2018).

2- Classification des herbicides Selon le mode d'action on distingue

Les principaux types incluent les désherbants sélectifs (majoritaires), les désherbants totaux, les débroussaillants pour le dessouchage et les défanants ciblant les organes aériens. S'ajoutent à cela les anti-germes, utilisés pour inhiber la reprise végétative des récoltes stockées (tubercules et bulbes) comme la pomme de terre.

3.3. Les fongicides

Substances d'origine naturelle ou chimique, les fongicides préviennent les maladies et les dommages causés par les champignons (mildiou, rouille, botrytis, etc.), permettant ainsi de préserver l'état sanitaire des cultures. Majoritairement composés de cuivre ou de soufre, ces produits se distinguent par leur classification basée sur leur mode d'action et leur provenance.

A- Selon leur mode d'action

On identifie deux types majeurs : les fongicides de contact (cuivre, soufre), qui ne migrent pas dans la plante mais sont écotoxiques, et les fongicides systémiques synthétiques. Ceux-ci sont absorbés, véhiculés par la sève dans tout l'organisme végétal et agissent spécifiquement contre les champignons, même à faible concentration.

B- Selon leur origine

Dans ce cas on distingue :

B.1. Les fongicides minéraux :

- Parmi les fongicides cupriques, on compte l'oxychlorure de cuivre, le sulfate de cuivre ainsi que la bouillie bordelaise. Ce traitement traditionnel est formé d'un mélange de sulfate de cuivre neutralisé par de la chaux et de l'eau.
- Les fongicides à base de soufre présentent une toxicité très faible pour l'homme et les animaux lorsqu'ils sont utilisés correctement. Cependant, l'exposition directe ou continue présente des risques d'irritation pour les yeux, l'épiderme et le système respiratoire. Pour prévenir ces effets sur la santé humaine et animale, le respect rigoureux des consignes de protection est impératif.
- Les fongicides à base de permanganate de potassium : utilisé notamment pour la prévention et le traitement de certaines maladies des plantes comme l'oïdium, le mildiou et le chancre. Il peut être utilisé en solution aqueuse à des concentrations variables, et son action est basée sur ses propriétés oxydantes.

B.2. Les fongicides organiques :

Les fongicides organiques sont le groupe le plus connu, caractérisé par une grande rapidité d'action, une toxicité élevée et une grande diversité chimique. Parmi ces fongicides organiques on distingue :

- Les carbamates : Ce groupe rassemble principalement les carbamates classiques, les thiocarbamates et les dithiocarbamates, utilisés spécifiquement selon les cultures. Par ailleurs, les benzimidazoles (carbendazim, benomyl, thiabendazole), bien que dérivés de cette structure chimique, sont considérés comme une famille distincte de fongicides systémiques et non comme des carbamates proprement dits.
- Les amides : Leur application couvre le traitement des sols et l'assainissement des semences avant les semis (Artals, 2024).

4. Utilisation des pesticides :

4.1. Utilisation des pesticides au niveau mondial :

Estimé à près de 40 milliards de dollars, le marché mondial de la protection des cultures demeure globalement stable depuis deux décennies. On observe toutefois que des phénomènes climatiques (sécheresses européennes, pluies excessives en Océanie) influencent les besoins régionaux. En modifiant la dynamique des ravageurs et des maladies, ces variations climatiques induisent une utilisation accrue, bien que souvent temporaire, de pesticides.

Plusieurs études prévoient que le changement climatique pourrait accentuer ces effets à moyen et long terme, en favorisant la prolifération de certains ravageurs ou pathogènes, ce qui tendrait à augmenter la consommation de pesticides dans certaines zones géographiques. Toutefois, ces impacts sont complexes et dépendent aussi des stratégies d'adaptation agricole, des politiques environnementales et des innovations technologiques visant à réduire l'usage des pesticides.

Les États-Unis sont le premier consommateur mondial de pesticides, représentant environ 35% de la consommation globale. Ils sont suivis par l'Inde, puis par des pays européens dont la France, qui est le premier consommateur en Europe avec une part d'environ 24,4%, suivie de l'Allemagne. Cette tendance à forte utilisation se poursuit également dans plusieurs pays en développement (pays du Tiers-monde).

Malgré les recommandations issues des politiques de protection de l'environnement, la France demeure largement en tête en Europe en ce qui concerne l'utilisation des produits phytosanitaires (insecticides, herbicides et fongicides). Ces substances sont fréquemment détectées dans différents compartiments de l'environnement tels que l'air, l'eau et les sols.

La pression phytosanitaire varie selon les régions : 3 kg/ha en Europe et 2,5 kg/ha aux États-Unis, contre seulement 0,5 kg/ha en Inde. Dans les zones européennes et nord-américaines, les herbicides ont pris l'ascendant sur le marché, atteignant 46,3 % de l'utilisation totale, ce qui témoigne de leur importance croissante dans les systèmes de culture intensifs (Ramade,;Schreinemachers&Tipraqsa, 2012). Les fongicides occupent 25,7 % du marché, portés par l'accroissement des surfaces dédiées au maïs, alors que sous les tropiques, les insecticides restent majoritaires avec 50 % des volumes appliqués (pour une moyenne mondiale de 23,7 %). Cette répartition évolue avec la diversification agricole liée au développement économique : en Chine, la transformation de vastes étendues de rizières en zones maraîchères a diversifié la gamme des produits utilisés. Dans ce contexte de mutations agricoles, l'usage des pesticides à l'échelle mondiale continue de croître régulièrement. La

période 1961-2004 a été marquée par un quadruplement de l'utilisation des pesticides par hectare, atteignant 2 kg/ha au niveau mondial. Cette dynamique témoigne d'une transition vers des modèles agricoles intensifs, avec des zones de forte application comme la France (35 % de la surface totale traitée) et les États-Unis (20 %) (Tahar, 2017).

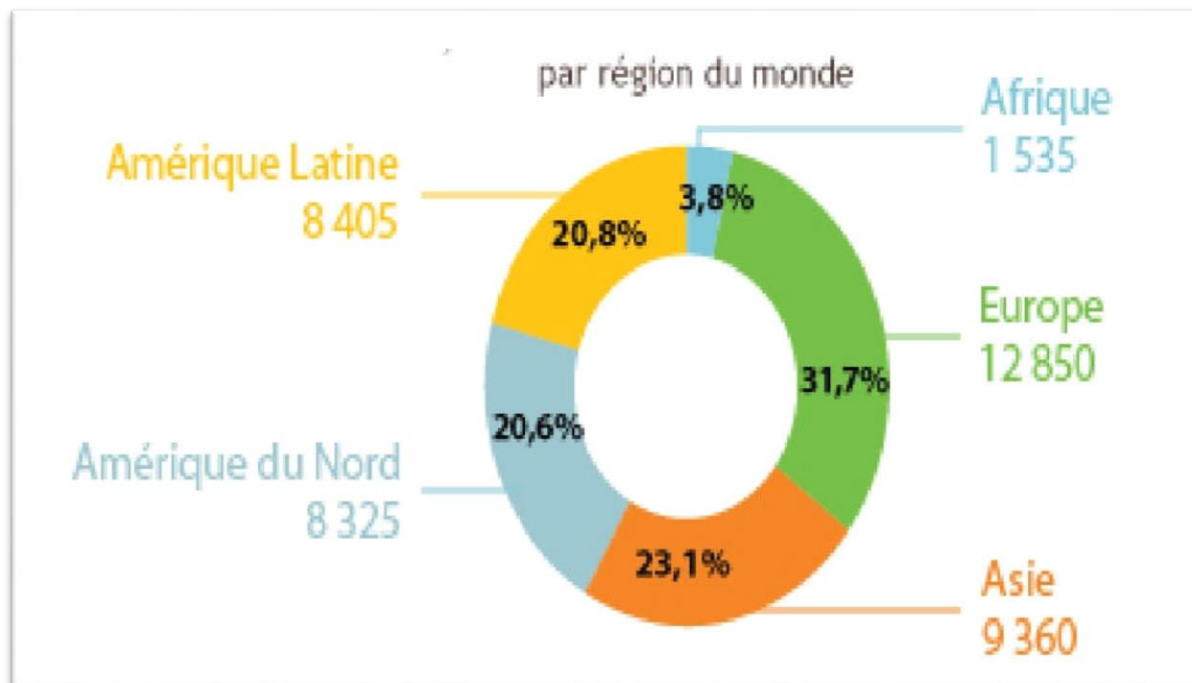


Figure 1: Répartition du marché mondial des pesticides par région du monde.

Source : Observatoire des pesticides – www.observatoire-pesticides.fr

4.2. Utilisation des pesticides au niveau national :

En Algérie, la production de pesticides a d'abord été prise en charge par des structures nationales spécialisées telles qu'Asmida et Moubydal. Cependant, avec le développement du secteur agricole, de nombreuses entreprises privées se sont orientées vers l'importation d'insecticides, herbicides et fongicides. Actuellement le marché algérien des pesticides est dominé par l'importation, bien que certaines unités locales assurent encore une part de la production. Cette situation reflète une dépendance accrue vis-à-vis des fournisseurs étrangers, notamment pour les produits à large spectre et de nouvelle génération. Le pays compte environ 400 produits phytosanitaires homologués, parmi lesquels une quarantaine est régulièrement utilisée par les agriculteurs (Boucherit, Hattou & Melhani, 2021).

Selon les statistiques du commerce international, l'Algérie a importé en 2024 des insecticides pour une valeur d'environ 38 millions USD et des fongicides pour plus de 30 millions USD. La valeur totale des importations de produits phytosanitaires dépasse 100 millions USD par

an, ce qui traduit une forte dépendance vis-à-vis des marchés étrangers pour l'approvisionnement en pesticides. Cette dépendance reste particulièrement marquée pour les produits de nouvelle génération et les formulations à large spectre <https://www.trademap.org>

Tableau 2: Liste indicative établie à partir des principaux produits phytosanitaires utilisés en Algérie selon (Soudani et al., 2024)

Nom commercial / matière active	Type	Usage principal
Glyphosate (ex. Mamba 360 SL, Roundup)	Herbicide	Désherbage total, maraîchage,
Linuron	Herbicide	Légumes, pomme de terre
Metribuzine	Herbicide	Tomate, pomme de terre
Acétamipride	Insecticide	Légumes, agrumes, protection général
Lufenuron	Insecticide	Protection fruits et légumes
Diazinon	Insecticide	Cultures maraîchères et arboriculture
Malathion	Insecticide	Diverses cultures, lutte contre ravageurs
Penconazole	Fongicide	Fruitiers, vignes
Chlorothalonil	Fongicide	Pomme de terre, tomate, céréales
Folystar 400 SC	Fongicide	Maraîchage, céréales
geDomark 40 (Tétraconazole)	Fongicide	Céréales, betterave, vigne
Granstar 75 DF (Tribenuron-méthyle)	Herbicide	Grandes cultures, céréales

La gestion des produits phytosanitaires est régie par la loi n° 87-17 du 1er août 1987. Ce texte législatif encadre strictement toutes les étapes de la filière : depuis l'homologation et la production jusqu'à la commercialisation, l'étiquetage et les conditions d'utilisation, garantissant ainsi un contrôle sur l'ensemble du cycle de vie des substances.

Durant ces dernières années, l'usage des pesticides s'est considérablement intensifié en Algérie, touchant divers domaines, avec une prévalence dans le secteur agricole, qui devient le principal utilisateur. Des quantités significatives de pesticides et de raticides sont appliquées, principalement pour traiter les cultures, lutter contre les ravageurs et augmenter les rendements agricoles (Soudani, 2022).

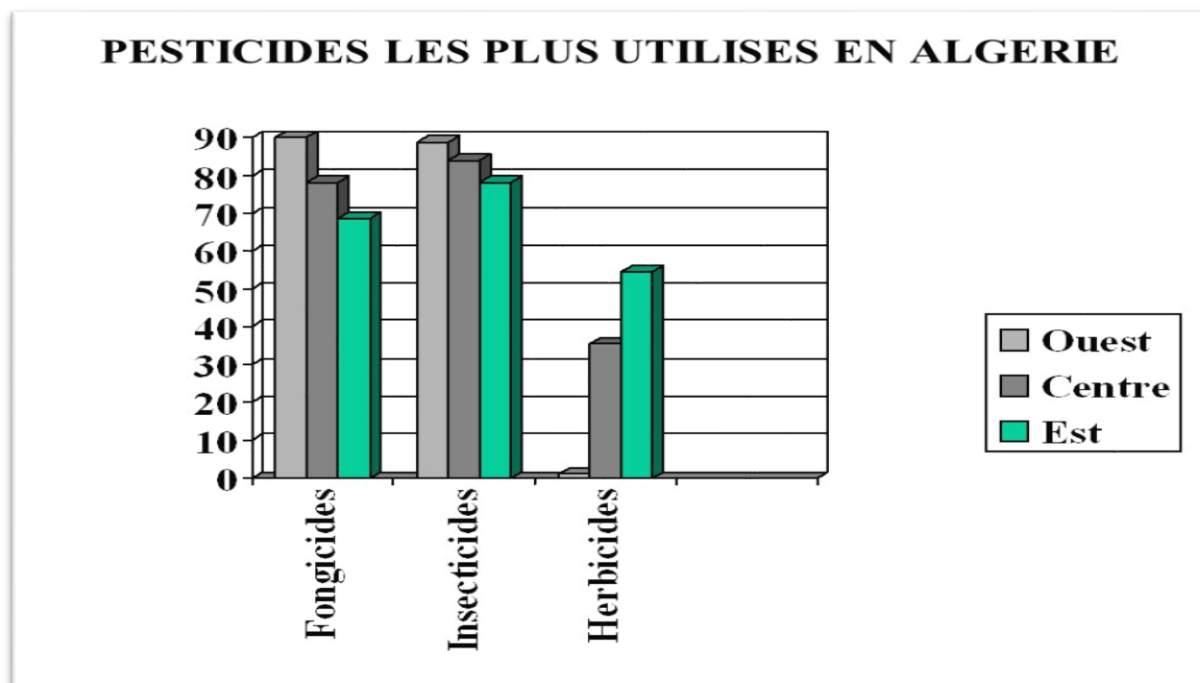


Figure 2: Utilisation, évaluation et impacts des pesticides en Algérie
(Moussaoui et al., 2012).

Ce graphique illustre les types de pesticides les plus utilisés en Algérie selon les trois régions (Ouest, Centre et l'Est) :

- Les fongicides sont les plus utilisés, notamment dans l'Ouest et le Centre, avec des taux dépassant 80 %.
- Les insecticides viennent en deuxième position, avec une utilisation relativement élevée dans toutes les régions.
- Les herbicides, quant à eux, sont utilisés à des niveaux inférieurs, mais leur usage est plus élevé dans l'Est que dans l'Ouest.

Ces différences régionales reflètent les spécificités agro-climatiques et les types de cultures dominantes dans chaque zone.

Tableau 3: Pesticides les plus couramment commercialisés et utilisés par les ouvriers agricoles et leurs classes toxicologiques (WHO, 2020)

Catégorie de pesticide	Ingredient actif	Famille chimique	Fréquence	Classe OMS
	Penconazole	Triazole	9,00%	III

	Mancozeb	Dithiocarbamate	7,00%	U
	Maneb	Dithiocarbamate	6,00%	U
	Triadimenol	Triazole	5,00%	II
	Copper Oxychloride+Mancozeb	Inorganicsubstance + Dithiocarbamate	4,00%	II
	Cymoxanil+Mancozeb	Acetamide+ Dithiocarbamate	3,00%	II
	Thiophanate-Methyl	Carbamate	2,00%	U
Fongicides 50%	Difenoconazole	Triazole	2,00%	II
	Metalaxyl-M	phenylamide	2,00%	II
	Trifloxystrobin	Strobilurin	2,00%	U
	Fosetyl-al	Phosphonate	2,00%	U
	Hexaconazole	Triazole	1,00%	III
	Carbendazim	Carbamate	1,00%	U
	Chlorothalonil	Organochloride	1,00%	U
	Propamocarb	Carbamate	1,00%	U
	CopperOxychloride+ Iprovalicarb	Inorganicsubstance + carbamate	1,00%	II
	Folpet	phthalimide	1,00%	U
	Acetamiprid	Neonicotinoid	13,00%	II
	Abamectin	Avermectin	10,00%	Ib
	Imidacloprid	Neonicotinoid	7,00%	II
	Pirimiphos-Methyl	Organophosphorus	2,00%	II
	Parathion-methyl	Organophosphorus	2,00%	Ia
	Spinosad	Spinosyn	2,00%	III
Insecticides 43%	Chlorantraniliprole	Diamide	1,00%	U
	Cyromazine	Triazine	1,00%	III
	Lambda-Cyhalothrin	Pyrethroid	1,00%	II
	Dimethoate	Organophosphorus	1,00%	II
	Thiamethoxam-Lambda-cyhalothrin	Neonicotinoid + Pyrethrinoid	1,00%	II
	Methomyl	Carbamate	1,00%	Ib
	Chlorpyrifos	Organophosphorus	1,00%	II
Herbicides 4%	Glyphosate	Organophosphorus	2,00%	III
	Linuron	Substitutedurea	1,00%	III
	Haloxifop-R	Organophosphorus	1,00%	II
Acaricides 3%	Spirodiclofen	Tetronicacid	2,00%	III
	Hexythiazox	thiazolidinone	1,00%	U

Ia=extrêmement dangereux; Ib=très dangereux; II=modérément dangereux; III=légèrement dangereux=peu susceptible de présenter un danger aigue n usage normal; FM=fumigant, non classé; O=obsolète en tant que pesticide, non classé.

5. l'impact des pesticides :

5.1. Impact sur le sol :

Une utilisation non maîtrisée des pesticides altère durablement la microbiologie des sols. En éliminer les populations bactériennes et fongiques indispensables, ces produits provoquent un appauvrissement biologique qui nuit à la santé globale de l'écosystème terrestre et compromet les rendements agricoles à long terme, la surexploitation des engrais chimiques et des pesticides affecte directement la vie microbienne du sol. Si ces intrants peuvent offrir des rendements à court terme, leur utilisation prolongée appauvrit progressivement le sol en organismes utiles, réduisant ainsi sa capacité à retenir et recycler les nutriments. Par exemple, de nombreux végétaux dépendent de micro-organismes spécifiques pour transformer l'azote atmosphérique en nitrates assimilables. Certains herbicides utilisés en aménagement paysager perturbent gravement ce mécanisme naturel. De plus, la toxicité induite par les résidus de produits phytosanitaires s'accumule dans le sol, entraînant des effets négatifs sur les cultures, pouvant aller jusqu'à une baisse notable de la productivité agricole.

Tableau 4: Propriétés et fonctions des principaux éléments détectés par la méthode XRF dans les sols agricoles (Baize, 2000).

Élément	Fonction dans le sol	Catégorie	Remarques principales
NO ²⁻	Forme réactive de l'azote ; absorbée rapidement par les plantes.	Macro-élément nutritif.	Peu stable dans le sol ; indicateur de l'activité biologique ou pollution ponctuelle.
P ₂ O ₅	Source de phosphore, essentiel pour la croissance racinaire.	Macro-élément nutritif.	Fixé dans le sol calcaire ; peut être limité en disponibilité
Potassium assimilable (K ₂ O)	régule la pression osmotique et la qualité des fruits.	Macro-élément nutritif.	Peu mobile dans le sol ; souvent lié à la capacité d'échange cationique (CEC).
Oxyde de fer (Fe ₂ O ₃)	joue un rôle dans les réactions redox et la structure du sol.	Oxyde métallique (essentiel).	Présent naturellement ; pas considéré comme polluant à faibles concentrations.
(Oxyde d'aluminium) Al ₂ O ₃	influence la réactivité des sols acides.	Oxyde métallique (essentiel mais toxique à forte dose).	Peut interagir avec le phosphore et limiter sa disponibilité.
Oxyde de chrome (Cr ₂ O ₃)	indicateur de contamination.	Métallourd / trace.	Non essentiel pour les plantes ; toxique à certaines concentrations.
Oxyde de manganèse (Mn ₂ O ₃)	oligo-élément essentiel en faibles quantités.	Micro-élément nutritif.	Intervient dans la photosynthèse ; toxique à fortes doses.
Cuivre (Cu)	oligo-élément essentiel pour certaines enzymes.	Micro-élément nutritif (mais aussi métal lourd).	Peut s'accumuler dans les sols suite aux traitements fongicides.

Les éléments étudiés dans le sol présentent des rôles et des implications variés. Les formes réactives de l'azote telles que le NO₂⁻ constituent des macroéléments nutritifs

rapidement assimilés par les plantes et indispensables à leur croissance. De même, le phosphore (P_2O_5) joue un rôle essentiel dans le développement racinaire et le métabolisme énergétique, tandis que le potassium assimilable (K_2O) régule l'équilibre osmotique et améliore la qualité des fruits. Parmi les oxydes métalliques, l'oxyde de fer (Fe_2O_3) est fondamental dans les réactions d'oxydoréduction et contribue à la structure et à la couleur des sols, alors que l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) influence fortement la réactivité des sols acides, pouvant devenir toxique à forte concentration. L'oxyde de chrome (Cr_2O_3), en revanche, ne constitue pas un élément nutritif mais plutôt un indicateur de contamination, ce qui le classe parmi les métaux lourds. En petites quantités, certains oligo-éléments comme le manganèse (Mn_2O_3) et le cuivre (Cu) sont indispensables au fonctionnement enzymatique et au métabolisme des plantes ; cependant, lorsqu'ils s'accumulent, ils peuvent exercer des effets toxiques et contribuer à la pollution des sols. Ainsi, la distinction entre macro-éléments, micro-éléments et métaux lourds permet de mieux comprendre l'équilibre fragile entre la fertilité et la contamination des écosystèmes agricoles.

5.2. Impact sur l'eau :

L'infiltration des substances chimiques dans le profil du sol provoque une pollution durable des eaux souterraines. Ce processus, combiné au transfert par ruissellement vers les eaux de surface, affecte l'ensemble de l'écosystème aquatique et compromet la qualité des ressources en eau destinées à l'agriculture et à la consommation humaine. En fait, plusieurs travaux de recherche menés aux États-Unis ont mis en évidence que presque chaque cours d'eau et environ 90 % des puits d'eau échantillonnés sont pollués par des résidus de pesticides (Gilliom *et al.*, 2007). Les sources d'eau et les eaux souterraines se sont également avérées contaminées. Plusieurs pays ont adopté la salubrité de l'eau potable pour contrôler et réduire la quantité de pesticides présents dans les réseaux publics de distribution d'eau (Nicolas, 2019).

5.3. Impact sur la biodiversité :

L'utilisation excessive et répétée des pesticides peut nuire fortement à la biodiversité. Elle affecte non seulement les ravageurs ciblés, l'impact des pesticides s'étend aux organismes non-cibles, notamment les insectes pollinisateurs, l'avifaune et la faune ichthyologique. Cette exposition altère les mécanismes physiologiques de base, déclenchant des ruptures dans les chaînes trophiques et menaçant la biodiversité globale des zones traitées ainsi que celle des zones humides périphériques. (Soudani, 2022).

5.4. Impact sur la santé humaine :

L'homme, en tant que consommateur indirect des produits phytosanitaires, est exposé aux pesticides que l'on retrouve partout : dans le sol, les fruits et légumes, l'eau potable et l'atmosphère. Il se retrouve ainsi confronté aux impacts potentiels de ces substances. Les impacts sur la santé varient en fonction du type de pesticide. Plusieurs études épidémiologiques, notamment chez les animaux, ont montré un lien entre l'exposition aux pesticides et l'apparition de certaines pathologies, ainsi qu'une augmentation des risques sanitaires, notamment en cas d'exposition professionnelle. L'exposition aux pesticides peut causer un certain nombre de problèmes de santé, notamment : (Brosché, 2004.)

- Les problèmes respiratoires : l'inhalation de pesticides peut causer des problèmes respiratoires tels que l'asthme, la bronchite et la pneumonie.
- Les problèmes neurologiques : En ciblant le système nerveux, les pesticides déclenchent des réactions physiologiques néfastes : les individus exposés peuvent souffrir de maux de tête intenses, de pertes d'équilibre, ainsi que de dysfonctionnements musculaires se traduisant par des tremblements ou des convulsions.
- Les problèmes de reproduction : les pesticides peuvent affecter la reproduction et causer des problèmes tels que la stérilité, les fausses couches et les malformations congénitales.
- Les cancers : L'exposition prolongée aux pesticides peut augmenter le risque de cancers.

6. La persistance des pesticides :

La persistance est la propriété d'un produit phytosanitaire de rester actif pendant une longue période de temps. Un pesticide est persistant si la matière active ne disparaît pas dans l'environnement facilement. Les composés persistants peuvent s'accumuler et pénétrer dans l'environnement, dans le sol ou dans la chaîne alimentaire. Le cycle de contamination se conclut par l'accumulation de ces molécules dans les produits agricoles destinés à l'alimentation humaine. La présence de ces résidus dans la viande, le lait et les produits maraîchers constitue une voie d'exposition directe pour le consommateur. De cette façon, les hommes sont également exposés aux pesticides. D'autre part, la résistance des organismes nuisibles augmente ce qui rendra nécessaire l'utilisation d'un pesticide différent auquel le fléau n'est pas encore résistant (Aloui, 2020)

7. Utilisation raisonnée et durable des pesticides:

Le concept d'usage durable des produits phytosanitaires repose sur un équilibre entre la réduction de la toxicité pour l'homme et la nature et le maintien d'une défense performante des cultures. Il s'agit de rationaliser les interventions pour préserver les ressources vitales sans compromettre la lutte contre les bioagresseurs qui menacent la productivité agricole. Voici quelques principes de l'utilisation durable des pesticides : (Bérubel et *al.*, 2023).

- La prévention : La lutte contre les fléaux agricoles commence par une stratégie préventive basée sur des techniques culturales adaptées. En privilégiant la rotation des espèces, la sélection de semences résistantes et une structure de sol équilibrée, l'agriculteur renforce la résilience des cultures face aux attaques de ravageurs et à la concurrence des adventices.
- Le choix des pesticides : Le choix des produits phytosanitaires doit s'orienter vers des molécules à faible impact toxicologique et environnemental. L'intégration de ces produits dans la gestion des cultures ne doit intervenir qu'en ultime phase, après avoir épuisé les alternatives préventives et mécaniques disponibles pour contenir les ravageurs et les maladies.
- L'utilisation contrôlée : Le respect scrupuleux des préconisations du fabricant est une condition sine qua non pour un usage sécurisé des pesticides. Cette conformité porte sur le dosage précis, le respect des fenêtres climatiques optimales et le respect des délais de carence, indispensables pour éviter la présence de résidus toxiques dans les produits finis.
- La réduction des pertes : Afin de minimiser l'empreinte environnementale, une attention particulière doit être portée au stockage et à la manipulation des pesticides. Un entreposage adéquat, loin des points d'eau et hors de portée des personnes non autorisées, garantit que les produits conservent leur efficacité tout en éliminant les risques de pollution accidentelle par perte de matière.

8. Alternatives aux pesticides :

Il existe un certain nombre d'alternatives aux pesticides, notamment :

- La lutte biologique : elle utilise des ennemis naturels pour lutter contre les ravageurs.
- La lutte culturale : elle utilise des pratiques culturales pour empêcher les infestations de ravageurs.
- La lutte physique ou mécanique : elle repose sur des méthodes comme le piégeage, le désherbage manuel ou les barrières.

L'utilisation durable des pesticides est importante pour protéger la santé humaine et le milieu de vie, tout en garantissant la sécurité alimentaire. Il est crucial de transformer les modèles de protection des plantes en privilégiant la responsabilité environnementale et le développement de solutions vertes. Cela implique non seulement d'optimiser les doses utilisées, mais aussi de remplacer progressivement les substances les plus préoccupantes par des alternatives biologiques et mécaniques respectueuses des cycles naturels (Hossain et *al.*, 2017).

CHAPITRE II:

**LA ZONE
D'ÉTUDE**

1. Présentation géographique et administrative

Sur le plan géographique, Boussaâda se situe à une distance de 234 km au sud-est de la capitale, Alger, et à seulement 13 km au sud-ouest du Chott El Hodna. La ville s'établit à une altitude de 611 mètres, sous les coordonnées géographiques 35°13'N et 4°10'E.

Entourée des communes d'Oued Sidi Brahim, El Maarif, El Haouamed, Oultem, El Hamel et Tamsa, Boussaâda constitue un pôle administratif et routier majeur. Sa position sur les routes nationales n°8 et n°46 lui confère un rôle de carrefour idéal. En plus d'être l'oasis la plus septentrionale, elle articule les flux entre le littoral méditerranéen et le Sahara, servant de pont entre les Ziban, le M'zab et les grandes villes côtières ou de l'Est comme Constantine.(Araba, 2023).

Boussaâda appartient administrativement à la wilaya de M'Sila. Elle se distingue par son rôle de charnière écologique, située entre les hautes plaines du nord et le versant sud de l'Atlas saharien. Elle couvre une superficie totale de 249,34 km², pour une population estimée à 123 236 habitants, ce qui en fait un centre névralgique du centre-est algérien.

Sur le plan morphologique, la région de Boussaâda présente un relief varié composé de collines, de zones basses et de terrains sablonneux. Cette diversité s'explique par la nature des formations du sol, principalement constituées de couches argileuses compactes et de roches calcaires formées il y a environ 100 millions d'années. On y trouve aussi des structures du sous-sol déformées, composées de roches calcaires, argileuses et sableuses, datant de périodes anciennes situées entre 150 et 90 millions d'années (Durand-Delga et Fontboté, 1980).

Parmi les principales formes de terrain, on distingue :

- Les zones déprimées (telles que les sebkhas, chotts ou dayas), Ces espaces fonctionnent comme des réceptacles naturels où convergent les précipitations et les dépôts de sédiments fins. En agissant comme des zones de décantation, ils permettent la sédimentation des éléments emportés par l'érosion hydrique, jouant ainsi un rôle clé dans l'hydrologie du bassin versant.
- Le secteur du R'mel se caractérise par un profil altimétrique allant de 400 à 550 mètres, où coexistent des édifices dunaires contemporains et des affleurements rocheux sous forme de collines isolées. Ce milieu est le siège d'une dynamique de sédimentation active, alimentée par le transport et le dépôt de particules fines par les eaux de surface.

Le secteur de Maâder Boussaâda représente l'essentiel du patrimoine foncier agricole de la région avec 2 984 hectares, couvrant près de 80 % de la SAU. Ce territoire est marqué par

une spécialisation dans le maraîchage intensif. C'est au sein d'une importante parcelle de cette zone, représentative des méthodes de production modernes et de l'utilisation régulière de pesticides, que nous avons mené nos investigations afin d'étudier les transferts et les impacts de ces substances dans l'environnement.(Aissou, 2019).

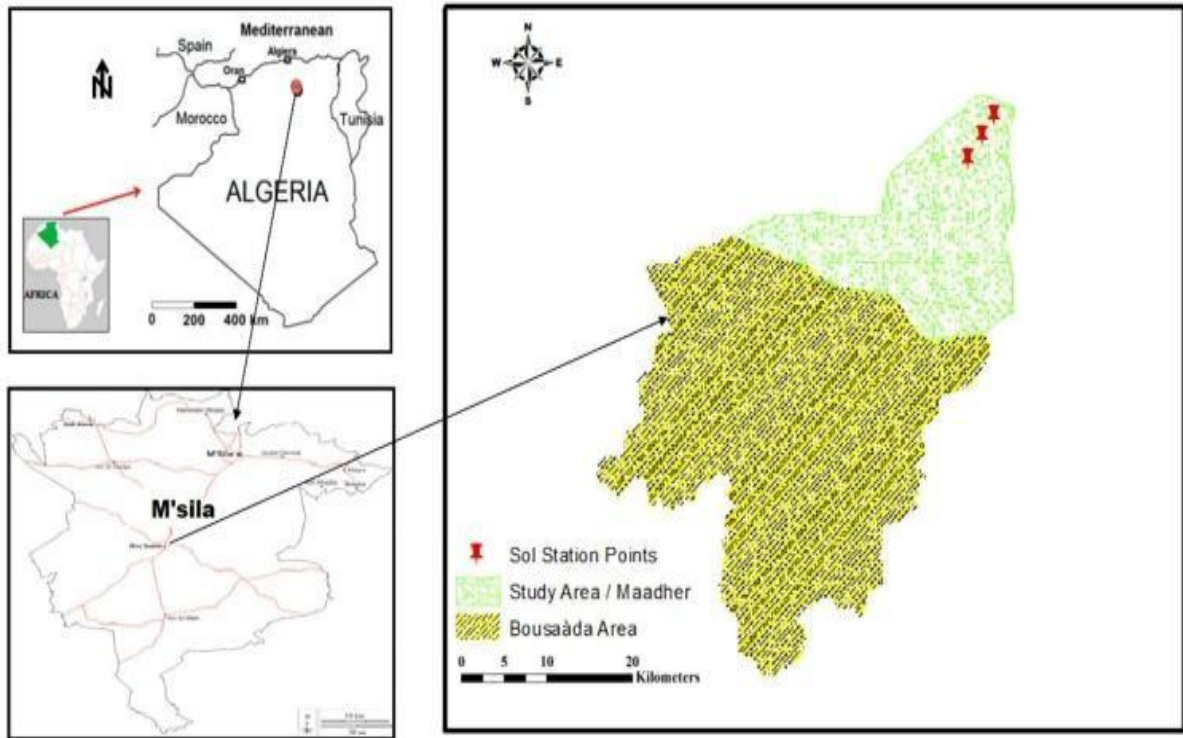


Figure 3: Carte de localisation de la région [Carte réalisée par l'étudiante].

2. Climatologie

En agriculture, le climat englobe les paramètres atmosphériques qui régissent la croissance végétale. Il se manifeste par la répétition saisonnière de conditions météorologiques types au sein d'une zone géographique. Son étude nécessite d'appréhender à la fois les variations d'une année sur l'autre et les tendances climatiques s'inscrivant dans la durée, afin d'anticiper les impacts sur les rendements et la pression des bio agresseurs.(De Parcevaux et Huber, 2007).

Selon les travaux de Legros (2007) et de De Parcevaux et Huber (2007), Les variables climatiques jouent un rôle de premier plan dans l'évolution des sols et la distribution spatiale des espèces. Le climat coordonne le cycle de vie des biocénoses en agissant sur des facteurs limitant comme les précipitations ou la durée du jour. Ces éléments conditionnent la réussite des phases physiologiques notamment la germination et la floraison et déterminent, in fine, la capacité de survie et le potentiel de reproduction des êtres vivants dans leur milieu.

La caractérisation d'un climat repose conventionnellement sur une période trentenaire, une échelle que Foucault (2016) invite toutefois à réévaluer en fonction de l'évolution des contextes climatiques et des protocoles d'analyse statistique. Cette notion intègre un complexe de variables atmosphériques (température, précipitations, humidité, régime des vents, pression et rayonnement solaire). L'étude de ces facteurs tient compte non seulement des cycles saisonniers réguliers, mais aussi de la variabilité interannuelle qui définit l'identité climatique d'une région.

Afin de caractériser l'environnement climatique de notre zone d'étude, nous avons exploité les relevés de la station **ONM** d'Ain-Ediss (35°20'N ; 04°12'E ; alt. 459 m), située en périphérie nord (environ 20 km). L'analyse s'appuie sur une base de données robuste couvrant 24 années consécutives, de 1994 à 2018. Cet échantillon temporel permet d'évaluer avec précision l'évolution des précipitations, des températures, de l'humidité relative, ainsi que de la vitesse du vent et de la durée d'ensoleillement sur le long terme.

2.1. La Température

La température constitue un paramètre fondamental influençant l'ensemble des activités physiologiques et des réactions chimiques. Elle dépend principalement du rayonnement solaire ainsi que de la pression atmosphérique (Lebougeois, 2010).

La température représente le paramètre climatique prépondérant, dont l'étude est essentielle pour comprendre les dynamiques écologiques. Son rôle est cruciale car elle conditionne l'activité biologique des organismes et détermine par conséquent, leur répartition à travers les différents écosystèmes. Elle agit comme un filtre environnemental qui définit les zones d'habitat favorables ou hostiles pour chaque espèce (Dreux, 1974).

Selon De Parcevaux et Huber (2007), Le régime thermique est un facteur clé qui structure la répartition de la flore dans le temps et l'espace. Le développement de chaque espèce végétale est étroitement lié à des niches thermiques précises ; l'existence d'un optimum de température est donc une condition sine qua non pour maximiser la croissance et la productivité des cultures. L'évolution thermique saisonnière définit le calendrier de l'activité végétale. Ce cycle, propre à chaque espèce, est synchronisé avec les fluctuations climatiques globales. Il est important de noter que la hiérarchie des contraintes environnementales change selon la latitude : la température domine la croissance dans les climats tempérés, tandis que les conditions hydriques dictent le rythme biologique dans les zones tropicales.

Par ailleurs, la température de l'air joue un rôle important dans la détermination du climat et dans le calcul du bilan hydrique, puisqu'elle conditionne des processus essentiels comme l'évaporation et l'évapotranspiration réelle (Bounab, 2018).

Tableau 5: Températures maximales, minimales et moyennes mensuelles de la région d'étude (Période 1994-2018) (ONM, 2020).

Mois T (°C)	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Moyenne Annuelle
T max	14.9	17.3	21.2	25.3	30.2	35.0	42.1	38.5	32.2	26.2	19.5	15.6	26.5
T min	4.4	6.0	9.0	12.8	17.4	21.7	24.2	23.8	20.1	14.7	8.7	5.3	14.01
T moy	9.65	11.65	15.1	19.05	23.8	28.35	33.15	31.5	26.15	20.45	14.1	10.45	20.25

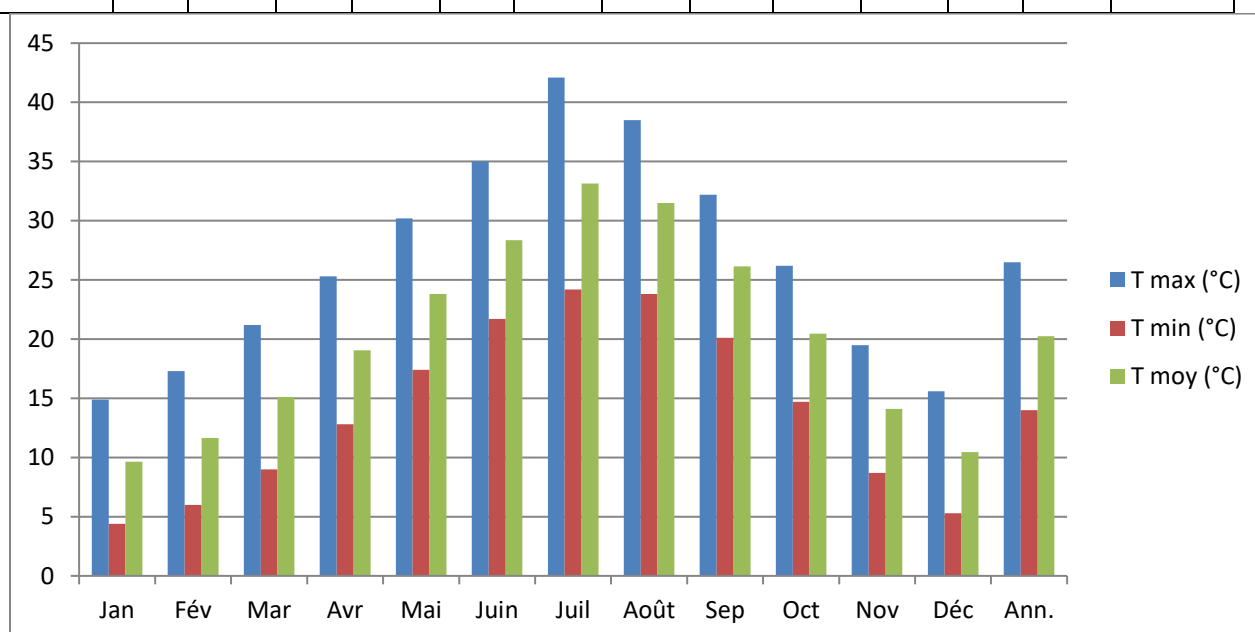


Figure 4: Températures maximales, minimales et moyennes mensuelles de la station de Boussaâda (période 1994- 2018).

Les températures maximales mensuelles varient de 14,9 °C en janvier à 42,1 °C en juillet, tandis que les minimales oscillent entre 4,4 °C en janvier et 24,2 °C en juillet, avec une moyenne annuelle de 20,25 °C. Le profil climatique ainsi décrit révèle une alternance entre des hivers cléments ou peu rigoureux et des périodes estivales caniculaires et sèches. Pour l'agriculteur, de telles conditions dictent le rythme du développement végétal, agissant directement sur les rendements et les besoins physiologiques des cultures tout au long de leur cycle: les températures modérées du printemps (mars-avril) favorisent la germination et le développement végétatif, notamment des céréales et légumineuses, tandis que les fortes chaleurs estivales (> 35 °C) entraînent un stress hydrique important, nécessitant une irrigation accrue pour préserver la productivité. L'augmentation précoce des températures printanières

limite le temps de maturation, obligeant les agriculteurs à choisir des variétés adaptées au climat local. La synergie entre chaleur et faible humidité accélère les besoins en irrigation via l'évapotranspiration. Le décalage des semis vers l'automne apparaît alors comme une solution clé pour exploiter l'eau de pluie et éviter les pics de chaleur estivaux. Cette adaptation est cruciale pour sécuriser la floraison et le rendement face aux risques climatiques qui pèsent sur les productions fruitières et maraîchères.

2.2. Les précipitations

Selon Djebaili (1978), les précipitations constituent un élément fondamental dans la caractérisation d'un climat. D'un point de vue quantitatif, elles sont généralement exprimées par la moyenne annuelle des pluies. Cette quantité joue un rôle déterminant, à la fois dans le maintien et la répartition du couvert végétal, et dans les processus de dégradation du milieu naturel, notamment par l'érosion.

Les précipitations constituent un facteur écologique fondamental qui assure l'alimentation des écosystèmes en eau. Elles influencent directement le fonctionnement des sols, la disponibilité des ressources hydriques, la croissance de la végétation, ainsi que la répartition et la dynamique des organismes vivants. Leur quantité, leur intensité et leur répartition saisonnière déterminent en grande partie les conditions écologiques d'un milieu et jouent un rôle essentiel dans les cycles biogéochimiques et le maintien de la biodiversité

Comme l'indique Zeroual (2022), complique l'estimation rigoureuse des hauteurs d'eau à l'échelle d'un territoire ou d'un bassin versant.

La mesure des apports atmosphériques se base sur la hauteur d'eau déposée par unité de surface horizontale durant un temps donné. Exprimée généralement en millimètres (mm), cette donnée permet d'uniformiser le calcul des précipitations quelles que soient leurs formes initiales (pluie, neige ou grêle)(Higy et Musy, 2004).

Tableau 6: Précipitations moyennes mensuelles de la région d'étude (en mm) période 1994-2018 (ONM, 2020).

Mois P (mm)	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Total
Précipitations	40	35	30	45	35	10	5	5	15	30	50	40	340

L'analyse des précipitations mensuelles moyennes enregistrées dans la région de Maâder Boussaâda sur la période 1994-2018 révèle un régime pluviométrique caractéristique des zones à climat semi-aride. Les pluies sont concentrées principalement en saison froide et au début du printemps, avec des maxima observés en janvier (40 mm), novembre (50 mm) et

décembre (40 mm). Le printemps connaît également des apports non négligeables, notamment en avril (45 mm). En revanche, la saison estivale, de juin à août, est marquée par une sécheresse prononcée, avec un minimum absolu enregistré en juillet et août (5 mm). Cette distribution saisonnière entraîne une forte irrégularité interannuelle et conditionne directement la disponibilité en eau pour l'agriculture. La recharge hydrique des sols se fait essentiellement durant l'hiver, période cruciale pour la préparation des cultures. Durant l'été, la rareté des précipitations, combinée aux températures élevées, accroît considérablement le déficit hydrique, rendant l'irrigation indispensable pour assurer la pérennité et la productivité des systèmes agricoles locaux.

L'analyse combinée des paramètres thermiques et pluviométriques de la région de Maâder Boussaâda met en évidence l'influence déterminante du climat semi-aride sur l'activité agricole locale. Les hivers, relativement frais et modérément humides, constituent la principale période de recharge hydrique des sols, grâce à des précipitations concentrées entre novembre et mars. En revanche, la saison estivale, marquée par des températures élevées dépassant souvent 40 °C et par une sécheresse quasi totale, entraîne une forte évapotranspiration et accentue le déficit hydrique. L'étroite corrélation entre les facteurs climatiques et la nature sablo-limoneuse du substrat limite la réserve utile en eau pour la végétation. Ces sols, structurellement pauvres en humus, ne permettent pas de tamponner les périodes de sécheresse, rendant l'agriculture locale tributaire des pluies de saison froide et d'un recours intensif à l'irrigation en été. Pour optimiser la production et minimiser les risques climatiques, il est indispensable de synchroniser le calendrier agricole et les techniques de culture avec ces réalités pédoclimatiques.

2.3. Le vent

Le vent, caractérisé par sa vitesse (m/s) et sa direction, est un paramètre climatique essentiel (Delannoy et al., 2016). Son étude permet d'appréhender les échanges complexes entre les différentes variables de l'atmosphère, comme le binôme vent-température. En sciences de la Terre, il est également étudié pour son rôle prépondérant dans l'érosion, particulièrement dans les zones où il façonne le paysage par le déplacement des particules fines.(Sbai et al., 1992).

Outre son rôle dans le façonnement des paysages, le vent est un facteur d'intensification du déficit hydrique par l'augmentation de l'évapotranspiration. Il conditionne la répartition des espèces végétales dans leur milieu. Sur le plan agricole, son pouvoir

desséchant sur les grains est une contrainte majeure qui peut accélérer la maturation ou altérer les composantes du rendement (Benguerai, 2011).

La dispersion dans l'atmosphère de particules organiques (spores, semences) et inorganiques (aérosols, particules fines) est un mécanisme moteur des agroécosystèmes. Son étude est essentielle pour la protection des végétaux, car elle conditionne la propagation des maladies et des adventices, tout en influençant les méthodes d'amélioration génétique via le transport du pollen sur de longues distances (De Parcevaux et Huber, 2007).

À Maâder Boussaâda, comme dans l'ensemble de la steppe algérienne, le vent est un agent d'érosion majeur qui dégrade la couverture végétale. Le transport de particules sableuses fines par les flux aériens appauvrit les sols et intensifie le phénomène de désertification. Ce processus physique réduit la résilience des terres agricoles et naturelles face aux contraintes climatiques extrêmes de la région (Melalih, 2012).

L'omniprésence du vent dans le secteur d'étude résulte d'une morphologie orographique spécifique : une dépression ouverte où convergent les courants d'air à travers les cols de montagne. Ce dispositif naturel fait de la région l'une des zones les plus ventées d'Algérie. La dynamique éolienne est marquée par une saisonnalité contrastée : une influence septentrionale (Nord-Est) glaciale et aride en hiver, laissant place en été au sirocco (Sud-Ouest). Ce vent saharien, chaud et étouffant, domine le climat durant quatre mois, impactant durablement l'environnement par sa force et sa durée (Belouadah, 2009).

Tableau 7: Vitesse moyenne mensuelle et annuelle du vent de la région d'étude (période 1994-2018) (ONM, 2020).

Mois Vent (km/h)	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Moy Ann.
Vitesse du vent	10	9	16	12	10	8	6	6	7	9	12	11	10

La dynamique éolienne locale se décompose en cinq circulations majeures (Belouadah, 2009):

L'environnement de la zone d'étude est rythmé par des circulations atmosphériques aux effets contrastés sur les cultures :

- **Les vents desséchants :** Le Sirocco (Sud) brûle les tissus végétaux en été, tandis que l'Echargui (Est/Nord-Est) apporte une rigueur thermique sèche en hiver.
- **Les vents de transition :** El-Gherbi (Ouest) se distingue par une nébulosité sans précipitations, limitant parfois le rayonnement solaire sans apport hydrique.

- **Les vents humides** : El-Dahraoui (Nord-Ouest) et El-Bahri (Nord) sont les pivots du bilan hydrique régional ; le premier étant le pourvoyeur majeur de pluies froides et le second introduisant une influence maritime régulatrice.

2.4. L'Humidité

Dans une approche pédologique, c'est-à-dire en tenant compte des interactions entre l'eau et les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol, l'humidité est définie comme la quantité d'eau contenue dans un sol, exprimée en proportion pondérale ou volumique, à un moment donné dans un certain volume de sol (Baize, 2016).

L'incidence de l'humidité sur les processus biologiques fondamentaux est déterminante (Dreux, 1980). L'humidité relative de l'air module directement la structure des populations en affectant le taux de survie des individus. Pour de nombreux taxons, la sensibilité aux écarts d'humidité est un facteur limitant qui régit non seulement la survie quotidienne, mais aussi les phases critiques de la reproduction, influençant par extension la répartition spatiale des espèces (Dajoz, 1983).

Tableau 8: Moyennes mensuelles de l'humidité relative (%) de la région d'étude pour la période (1994-2018). (ONM, 2020).

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Moy Ann.
Humidité relative (%)	60	58	55	50	48	40	35	33	40	50	65	70	50

L'évolution de l'humidité relative à Maâder Boussaâda (série 1994-2018) suit un rythme inversement proportionnel aux températures. La période hivernale concentre les valeurs les plus hautes (jusqu'à 70% en décembre), tandis que la période estivale est caractérisée par un air extrêmement sec, avec des minima de 35% en juillet et 33% en août. Cette dynamique, propre aux zones steppiques, explique l'intensité de l'évapotranspiration durant les mois les plus chauds, rendant l'irrigation indispensable au maintien de l'équilibre hydrique des cultures..

L'évolution saisonnière de l'humidité de l'air joue un rôle moteur dans la performance des agroécosystèmes de Maâder Boussaâda. L'ambiance humide hivernale sécurise les phases critiques de germination, tandis que le basculement vers une hygrométrie minimale en été crée une demande évaporative intense. En raison de la faible capacité de rétention d'eau des sols locaux, l'irrigation devient le seul levier permettant de compenser l'excessive

transpiration des plantes. La planification agricole doit donc s'orienter vers des calendriers de semis hivernaux et un choix variétal axé sur la tolérance à la sécheresse pour atténuer les risques climatiques.

2.5. L'Ensoleillement

L'ensoleillement correspond à la durée pendant laquelle un lieu reçoit le rayonnement solaire direct. Il est principalement influencé par la latitude et par le degré de nébulosité. Le climat lumineux d'un site dépend non seulement de la durée d'insolation, mais aussi de sa répartition horaire, de son intensité et de sa qualité (Zateroglu, 2021).

Chez les végétaux, la lumière joue un rôle essentiel non seulement pour la photosynthèse, mais également pour la régulation de leur développement. Trois phénomènes fondamentaux conditionnés par la lumière déterminent la vigueur des cultures : la production de matière organique via la photosynthèse, le développement architectural par la photo morphogenèse et la réaction aux cycles saisonniers par le photopériodisme. La maîtrise de ces processus est cruciale en agronomie pour optimiser le rendement et adapter le choix des cultures aux conditions d'insolation locales (Suty, 2014).

Tableau 9: Durée moyenne mensuelle d'ensoleillement (h) de la zone d'étude durant la période (1994-2018)

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Annuel
Ens (h)	180	190	220	250	280	300	320	310	270	240	200	180	2940

Le bilan héliotechnique de Maâder Boussaâda (série 1994-2018) confirme l'importance du rayonnement solaire comme facteur écologique dominant, totalisant près de 2940 heures annuelles. L'éclairement maximal est atteint en juillet (320 h), offrant des conditions optimales pour les cultures exigeantes en lumière, tandis que les minima hivernaux de 180 h marquent une réduction saisonnière de l'apport énergétique. Cette forte luminosité, couplée aux températures élevées, est un paramètre clé de la forte évapotranspiration observée dans la zone.

Selon Selmane (2023), Cette répartition traduit la prédominance d'un climat semi-aride à fort rayonnement solaire, caractéristique des hautes plaines algériennes. D'un point de vue agricole, cet ensoleillement élevé constitue un atout majeur pour la photosynthèse, favorisant la croissance rapide des cultures et la maturation des fruits. Cependant, combiné à des températures élevées et à une faible humidité estivale, il accentue l'évapotranspiration et le stress hydrique, en particulier pour les cultures sensibles à la sécheresse.

Comme l'ont souligné Halilat et al. (2002), dans les sols sablo-limoneux pauvres en matière organique de la région, l'exposition solaire intense accélère le dessèchement de la couche arable et peut diminuer la disponibilité en eau pour les racines superficielles. L'exploitation du potentiel héliotechnique local doit être assortie de mesures correctives pour pallier l'intensification du déficit hydrique. L'optimisation du rendement passe par l'adoption de techniques économes en eau, telles que et l'irrigation de précision, qui protègent la réserve utile du sol. En complément, l'adéquation entre le matériel végétal et l'environnement par le choix de génotypes tolérants à la phototoxicité et à la sécheresse est une condition sine qua non de la viabilité agricole.

3. Synthèse climatique

3.1. Le diagramme ombrothermique :

La méthode de Bagnouls et Gaussen (1957) propose une représentation combinée des précipitations et des températures afin de caractériser le climat d'une région. En adoptant une échelle où l'ordonnée des précipitations est le double de celle des températures, le diagramme permet d'identifier visuellement les périodes sèches. La période de sécheresse biologique est définie lorsque les précipitations mensuelles sont inférieures au double de la température moyenne mensuelle (Gaussen et Lauer, 1961).

Ces diagrammes permettent également de visualiser l'aire ombrothermique résultant du croisement des courbes de température et de précipitations (Lebourgeois, 2010). La magnitude de cette aire constitue un indicateur de l'intensité de la sécheresse (Le Houérou, 2000). L'objectif est ainsi de repérer les séquences mensuelles déficitaires en eau afin de caractériser le régime bioclimatique et les périodes critiques de sécheresse d'un site d'étude.

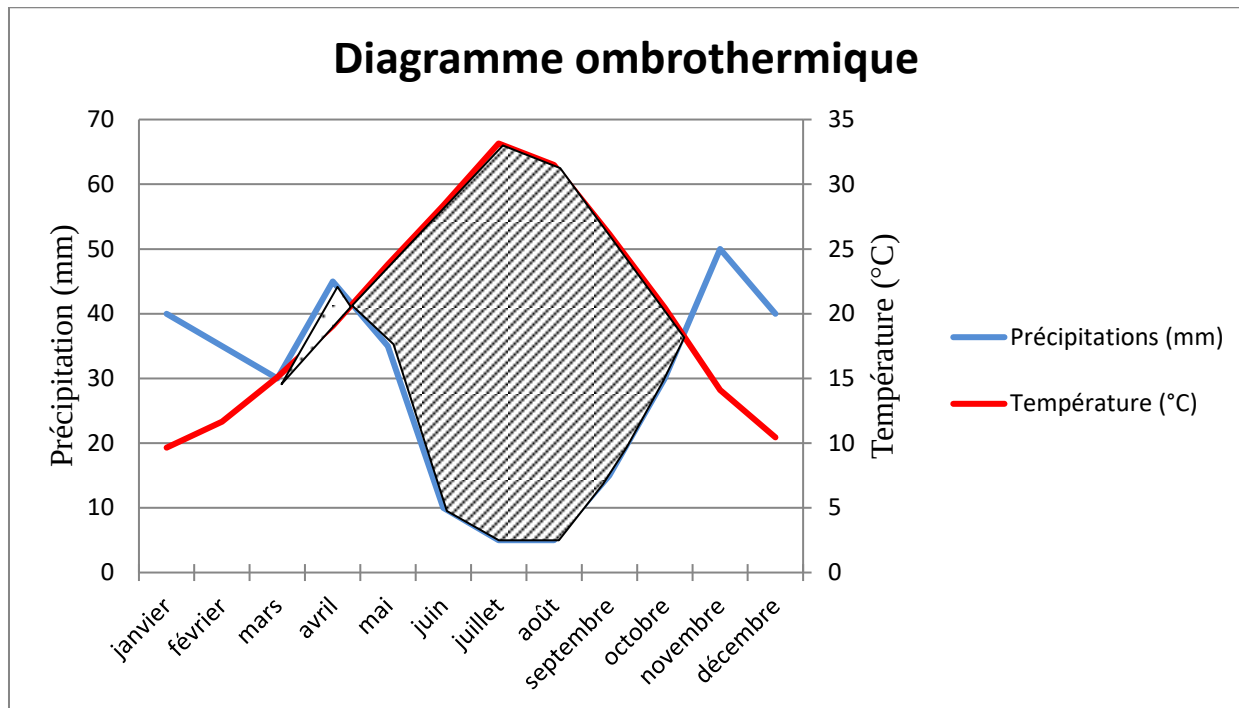


Figure 5: Diagramme ombrothermique de la région de Boussaâda pour la période 1994-2018.

Le diagramme ombrothermique de Maâder met en évidence une nette alternance entre deux périodes climatiques contrastées :

Selon le diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausсен, la période de sécheresse débute au mois de mai, lorsque les précipitations deviennent inférieures au double de la température moyenne mensuelle ($P < 2T$). Elle se prolonge durant les mois de juin, juillet, août, septembre et octobre, puis prend fin au mois de novembre, avec la reprise progressive des précipitations. Cette période sèche s'étend donc sur sept mois, ce qui traduit le caractère semi-aride de la région d'étude

Le régime pluviométrique de la région d'étude est caractérisée par des précipitations relativement abondantes (30 à 50 mm/mois) et des températures modérées (10 à 20 °C), favorisant une bonne disponibilité en eau dans le sol et le développement de la végétation, et une période sèche de juin à septembre, durant laquelle les précipitations deviennent très faibles, voire nulles, tandis que les températures atteignent 30 à 33 °C. Cette situation traduit une sécheresse estivale marquée, caractéristique du climat semi-aride de la région d'étude

Ce régime place la région de Maâder dans le domaine du climat semi-aride, marqué par des hivers relativement pluvieux et des étés chauds et secs.

La sécheresse prolongée de l'été constitue une contrainte majeure pour l'agriculture pluviale, imposant souvent le recours à l'irrigation complémentaire.

3.2. Etage bioclimatique (Climagramme d'Emberger) :

Afin d'étudier le climat des zones méditerranéennes et d'identifier les différentes phases bioclimatiques, Emberger a proposé dès 1955 un quotient pluviothermique, associé au climagramme, qui permet de distinguer les différents étages bioclimatiques (Emberger, 1955, 1971).

Cet indice est exprimé par la formule suivante :

$$Q_2 = (2000 \times P) / (M^2 - m^2)$$

Avec :

P : précipitations annuelles moyennes (mm)

M : Température mensuelle maximale moyenne (°K)

m : Température mensuelle minimale moyenne (°K)

$$\begin{aligned} Q_2 &= 680000 / (33,15 + 273^2) \\ &= 680000 / 93727,8225 - 76950,76 \\ &= 680000 / 16777,625 \\ Q_2 &= 40,53 \end{aligned}$$

Ce régime place la région de Maâder dans le domaine du climat semi-aride, marqué par des hivers relativement pluvieux et des étés chauds et secs.

La sécheresse prolongée de l'été constitue une contrainte majeure pour l'agriculture pluviale, imposant souvent le recours à l'irrigation complémentaire.

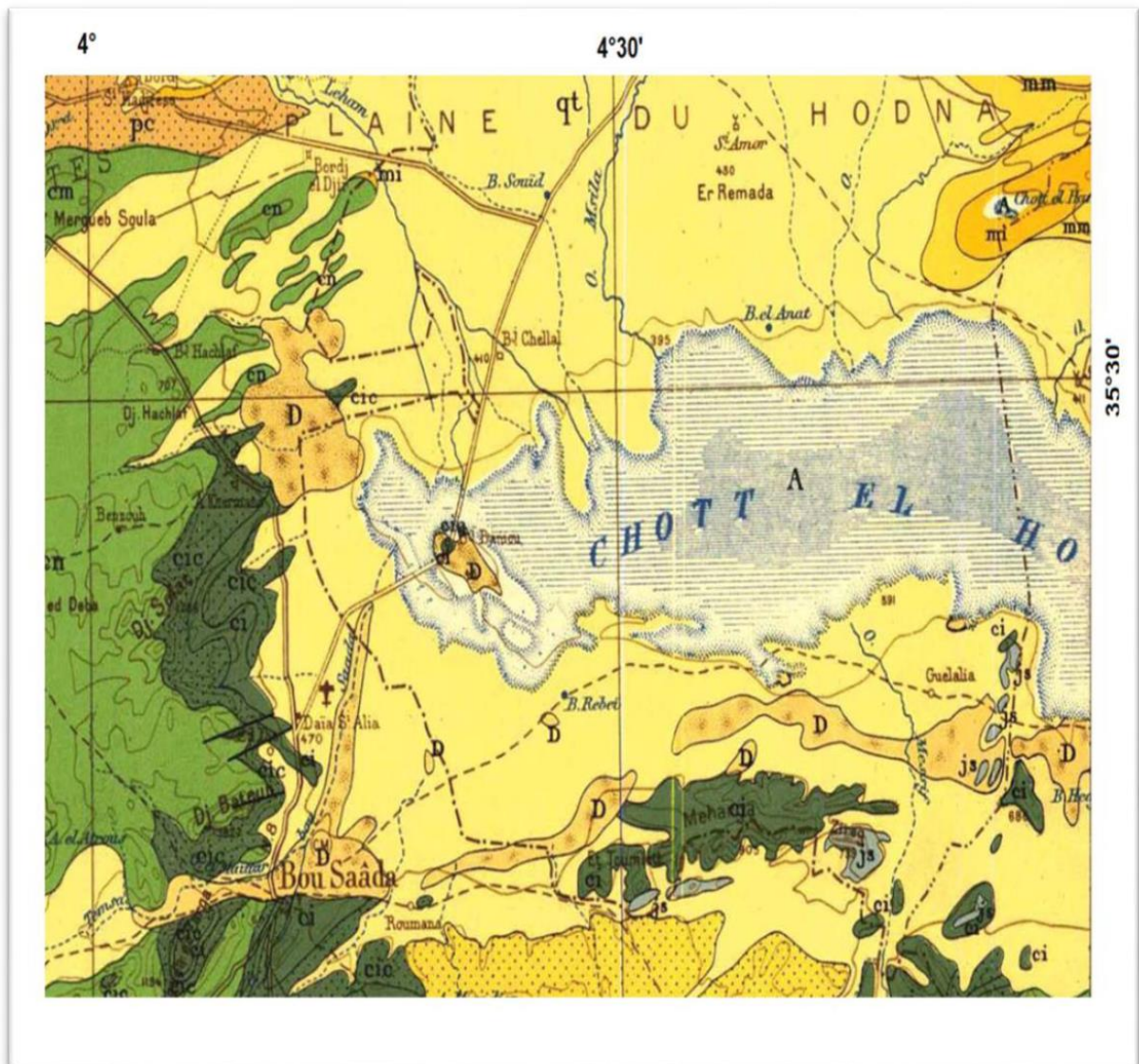
4. Géologie de la région d'étude

La position géographique de la zone, au point de contact entre l'Atlas tellien et l'Atlas saharien, confère à la région une configuration géologique hétérogène. On y observe d'importantes variations latérales de faciès au sein des séries stratigraphiques, ainsi qu'une superposition de styles tectoniques distincts témoignant d'une histoire géodynamique riche. Le cadre structural du centre du bassin s'articule comme suit (Guiraud, 1967) :

Du nord-ouest vers le sud-est, on distingue les ensembles suivants :

- L'anticlinorium des bibans : Constitué en majeure partie par un matériel crétacé argilo-marneux ou marno-calcaire, fortement plissé au cours de l'orogénèse alpine.
- La dépression sub-bibanique, dans laquelle les nappes telliennes d'origine septentrionale se sont mises en place au Miocène inférieur. Les différentes unités sont constituées par un matériel pelliculaire, marneux et parfois gréseux ; leurs limites sont souvent jalonnées par des diapirs gypso-salins du Trias.

- Les monts du Hodna : Il s'agit, grossièrement, d'un anticlinal orienté E-W, ayant subi plusieurs phases tectoniques depuis le crétacé. Il est constitué principalement de calcaires, marnes et grès du crétacé inférieur et supérieur.
- Le bassin subsidient du Hodna : Ce bassin tertiaire s'est installé depuis l'Eocène dans la région de M'sila et s'est étendu à toute la plaine du Hodna au cours du Miocène et du Pliocène.



Echelle : 1/500 000

Légende

qt: Quaternaire

mm : Miocène moyen

es : Eocène supérieur

Ct : Maastrichtien

t : Trias

D : Dunes

mi : Miocène inférieur

em : Eocène moyen

Cn : Aptien

pc : Pliocène

o : oligocène

ei : Eocène inférieur

Ci : Berriasien

Figure 6: Carte géologique de la zone d'étude (d'après Flandrin, 1952).

5- Pédologie de la région d'étude :

L'examen de la carte pédologique régionale révèle que la zone de Maâder Boussaâda fait partie intégrante de l'ensemble pédologique du Hodna. Ce territoire est caractérisé par une mosaïque de sols aux propriétés physico-chimiques variées. Cette hétérogénéité, résultant de l'interaction entre la topographie et les dépôts sédimentaires, laisse apparaître les types de sols suivants:

- Des lithosols et régosols, témoignant d'une faible évolution pédologique ;
- Des sols faiblement développés, souvent soumis à l'érosion ;
- Des sols calcimorphes, enrichis en calcaire actif ;
- Des sierozems, typiques des zones arides à semi-arides ;
- Des sols salins et gypseux, liés aux conditions climatiques et hydrologiques particulières du bassin. (Boyaudier, 1975 ; Bouneb, 2018).

La composition édaphique du secteur de Maâder Boussaâda est le reflet direct de son substratum géologique. Le caractère fortement carbonaté des sols du Hodna s'explique par l'omniprésence de formations lithorégiques calcitiques. L'analyse suggère que le calcaire subit une migration physique plutôt que chimique : transporté par les eaux sous forme de fragments rocheux ou de grains solides, il se dépose pour former des complexes de « calcaire colluvial ». Ce mécanisme de dépôt mécanique est fondamental pour comprendre l'hétérogénéité des sols de la plaine (Belouam, 1976). La lithologie locale est dominée par une alternance de dépôts détritiques (grès, puddingstones) et de sédiments fins (marnes, argiles). L'expression topographique de ces surfaces est étroitement liée à la structure profonde du bassin. Le contexte climatique aride favorise le piégeage et la cristallisation de minéraux évaporitiques, tels que le gypse et divers sels, particulièrement au sein des matrices argileuses (Despois, 1953).

Dans les zones agricoles irriguées de Maâder Boussaâda, ces caractéristiques se traduisent par une faible fertilité naturelle et une capacité d'échange cationique (CEC) réduite. Ainsi, l'apport régulier d'engrais minéraux et d'amendements organiques est indispensable pour maintenir et améliorer les rendements agricoles

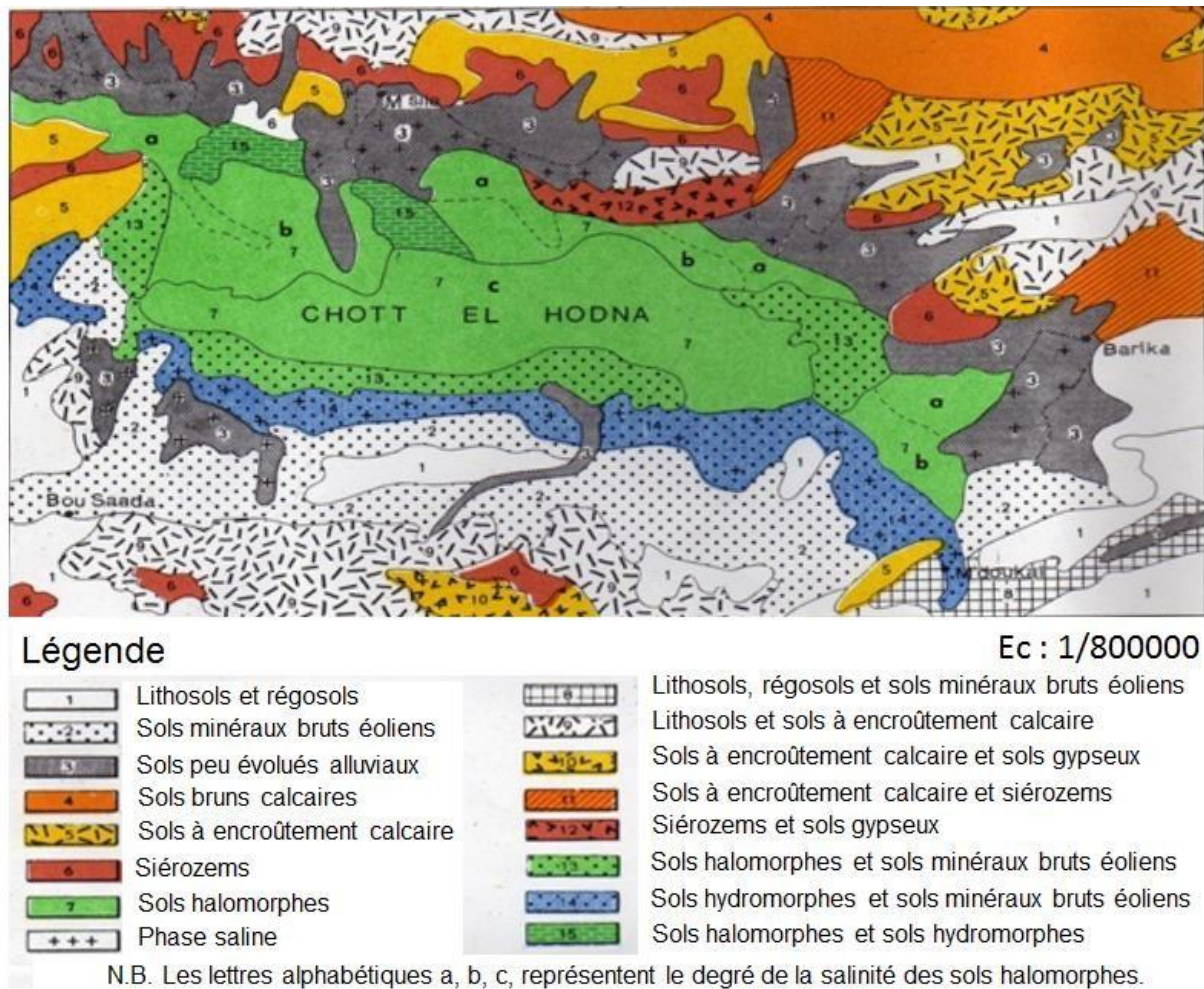


Figure 7: Carte pédologique de la région d'El-Hodna (Boyadgifu, 1975).

À Maâder Boussaâda, l'interaction entre l'érosion et l'accumulation éolienne a façonné un paysage dominé par des textures sableuses, bien que des zones argilo-marneuses subsistent. L'influence géologique est omniprésente à travers les débris de calcite intégrés à la matrice du sol. Cette structure physique, limitant pour l'agriculture, rend les amendements (organiques et minéraux) indispensables pour soutenir les cycles de culture et compenser les carences naturelles du milieu.

L'organisation du couvert pédologique à Maâder Boussaâda est le produit d'une dynamique multifactorielle. La nature des roches mères et les contraintes climatiques définissent le cadre minéralogique, alors que le relief et la disponibilité en eau régissent les processus de transfert et d'accumulation. Enfin, l'équilibre de ces sols est intimement lié à la composante biologique (végétation et faune du sol) et aux interventions humaines, qui agissent comme des agents de transformation majeurs du milieu physique.

6. Hydrologie et ressources hydriques de la région d'étude

L'hydrographie du bassin du Hodna reflète les contraintes climatiques régionales, où l'irrégularité des précipitations dicte le débit des oueds. À l'exception d'un réseau restreint d'artères pérennes alimentées par des sources de montagne (Oueds K'sob, El Ham, Barika, etc.), la majorité des cours d'eau présentent un caractère temporaire. La continuité hydraulique de ces oueds est souvent interrompue par des aménagements hydro-agricoles traditionnels (seuils en terre), provoquant un tarissement quasi systématique des sections aval. En dehors des périodes de crues, l'essentiel du réseau hydrographique demeure à sec.

6.1. Ressources en eaux superficielles

Le bassin du Hodna est drainé par un réseau hydrographique irrégulier, fortement influencé par le climat semi-aride. Dans la zone agricole de Maâder Boussaâda, les écoulements sont surtout observés lors des crues automnales et hivernales, alors que le reste de l'année demeure sec (Guerra, 1998). Pour une année moyenne, les apports en eau vers le Chott El Hodna sont estimés à environ 150 hm³/an (Ladgham et Zerguine, 2001).

Dans l'aire d'étude, deux oueds structurent le réseau principal :

- Oued Maiter, à débit irrégulier et à forte pente (sud-ouest/nord-est),
- Oued Boussaâda, à écoulement intermittent, autrefois alimenté par les sources gréseuses de l'Albien (Kebiche, 1994).

Ils sont complétés par des cours d'eau secondaires tels que l'oued Roumana et l'oued El Mehakoube, qui connaissent des crues soudaines lors de fortes averses. La majorité de ces écoulements convergents vers le Chott El Hodna, où l'évaporation rapide, favorisée par les températures élevées et le vent, réduit fortement leur disponibilité pour l'agriculture.

6.2. Ressources en eaux souterraines

La structure hydrogéologique du Hodna, bien qu'assimilée à un bassin fermé, renferme plusieurs formations aquifères s'étalant du Jurassique au Quaternaire (Derekov, 1973). Ces nappes constituent la principale ressource hydrique pour l'irrigation, mais leur qualité est très variable. Dans la région de Boussaâda, les terrains périphériques sont souvent salés, ce qui affecte la qualité des eaux souterraines et limite leur utilisation agricole. Malgré ces contraintes, de nombreux puits et forages sont exploités.

Les principales nappes identifiées sont :

- **La nappe phréatique (nappe de Boussaâda)** : constituée d'alluvions quaternaires, elle est localisée dans les dépôts des oueds et alimentée par l'irrigation et les précipitations. Seseaux presentment unesalinité relativementélevée (Mimoune, 1995).
- **La nappe profonde du Mio-Pliocène** : localisée au nord de la zone, formée de conglomérats, ses eaux sont moins salées que celles de la nappe phréatique. Des aquifères plus anciens, d'âge Crétacé et Jurassique, sont également exploités, mais restent peu étudiés (Amel, 2021).
- **L'aquifère de l'Éocène inférieur** : constitué de calcaires et de calcaires marneux, il représente l'aquifère le plus exploité. Il affleure au nord de la région et sa profondeur augmente vers le sud (Amel, 2021).

Les quantités des eaux souterraines sont estimes à 141 hm³, ainsi que le volume d'eau mobilisé pour l'irrigation est estimé à 154 hm³.

6.3. Enjeux hydriques locaux

Dans la zone d'étude, les conditions climatiques semi-arides et la variabilité des ressources en eau imposent un recours quasi permanent à l'irrigation. Une telle dépendance intensifie la vulnérabilité pédologique, favorisant l'accumulation de sels et la dénaturation des horizons superficiels. Ces phénomènes de dégradation altèrent les propriétés physico-chimiques du sol, créant un obstacle majeur à la pérennité des itinéraires techniques et à la résilience des exploitations (Salmane, 2023).



Figure 8: Hydrologie du Bassin d'El-Hodna (ANRH, 1984).

7. Milieu socio-économique :

7.1. La population et l'habitat :

D'après le tableau 8 qui présente l'évolution de la population de Boussaâda au cours des différents recensements entre 1966 et 2008, on remarque une croissance démographique continue et soutenue : la population est passée de 26 021 habitants en 1966 à 133 589 habitants en 2008, soit plus de cinq fois son effectif initial en l'espace de quatre décennies. Cette augmentation traduit un rythme de croissance accéléré, particulièrement marqué entre 1977 et 1998, période où la population a quasiment doublé.

Parallèlement, la densité de population est passée de 105 hab./km² en 1966 à 538 hab./km² en 2008, révélant une forte pression sur l'espace urbain et les ressources locales. Cette dynamique démographique constitue un facteur déterminant dans la transformation de la ville et explique en grande partie l'évolution urbaine de Boussaâda. Cette évolution est étroitement liée à la croissance démographique et aux politiques de développement mises en œuvre depuis les années 1970, suite à la promotion de M'sila au rang de wilaya. Elle s'est traduite par une extension rapide, souvent anarchique. Les images aériennes de 1972 et la carte topographique de 2004 mettent clairement en évidence cette dynamique d'expansion, marquée par une occupation accrue des rives de l'oued Boussaâda, de la zone dunaire et même des

versants du Djebel Azzedine. Toutefois, cette urbanisation s'est réalisée au détriment de la sécurité, car les zones les plus vulnérables aux inondations, aux ensablements et aux éboulements sont principalement occupées par des populations modestes et un habitat illicite.

Cette forte croissance démographique exerce également une pression sur les terres agricoles, notamment dans la plaine de Maâder Boussaâda, reconnue pour ses cultures céréalières, maraîchères et arboricoles (olivier, abricotier, grenadier), rendues possibles grâce à l'irrigation par pivot. Cependant, le potentiel agricole reste limité par le climat semi-aride de la région, caractérisé par une pluviométrie faible et irrégulière, une forte évapotranspiration et des températures estivales élevées. Ces conditions, combinées à l'urbanisation rapide et à l'expansion démographique, accentuent la vulnérabilité de la ville face aux risques naturels, tout en posant la problématique de la durabilité des ressources en sol et en eau. Cette expansion urbaine observée au cours des dernières décennies illustre ainsi les pressions multiples qui pèsent sur le territoire de Boussaâda.

Tableau 10: Évolution de la population de Boussaâda au cours des différents recensements entre 1966 et 2008.

Année	1966	1977	1987	1998	2008
Population	26 021	50 369	69 620	102 245	133 589
Densité (hab/Km ²)	105	203	281	412	538

Source : DPAT – M'sila (2009).

7.2. L'industrie :

Le tissu industriel de la wilaya de M'Sila présente le paradoxe d'être peu étoffé tout en étant composé d'unités d'importance stratégique nationale, dont il convient de citer :

- ✓ La centrale thermique de production d'énergie électrique de M'sila (Drâa El Hadja) d'une capacité de 880 Mégawatts ce qui en fait, en son genre, la plus puissante du continent.
- ✓ L'atelier central de maintenance Sonelgaz à M'sila-Drâa El Hadja, dispose de l'un des trois plus puissants tours au monde et de divers ateliers où sont exécutés des travaux allant de la mécanique de haute précision en passant par les alliages spéciaux à la réparation de machinerie lourde (transformateurs de puissance géants - équipements de cimenteries etc.).
- ✓ Unité extrusion-anodisation-refonte de l'Aluminium (ALGAL PLUS) unique en son genre en Algérie.
- ✓ Les centres emplisseurs de gaz propriétés de NAFTAL sis en zones industrielles de M'sila et de Boussaâda.

Bien que le tissu industriel de la wilaya de M'Sila présente des unités d'importance stratégique nationale, la ville de Boussaâda reste marquée par une faible diversification industrielle, avec une prédominance des activités artisanales et commerciales.

7.3. L'agriculture :

L'agriculture dans la région de Boussaâda, notamment au niveau du village agricole Maâder, repose sur une organisation agropastorale où la production végétale et animale est étroitement liée. La superficie agricole totale est estimée à 23 094 ha, dont 2 595 ha de surface agricole utile (SAU), avec 2 299 ha irrigués, tandis que les pacages et parcours occupent 17 739 ha, représentant la plus grande partie du territoire (SAB, 2014). Les cultures maraîchères occupent 306 ha, les cultures maraîchères constituent la production dominante, loin devant l'arboriculture (720 ha) et les fourrages (1 190 ha), alors que les céréales restent marginales avec 180 ha. On retrouve également des productions variées telles que la carotte, la betterave, l'oignon, l'ail et la pomme de terre, ainsi que des cultures arboricoles comme l'olivier, l'abricotier et le grenadier (Zembretal., 2016).

Toutefois, le climat semi-aride impose une forte dépendance vis-à-vis de l'irrigation, ce qui explique le recours croissant à l'exploitation des nappes phréatiques et profondes depuis les années 1970.

Cette richesse végétale est directement liée à la richesse animale, qui constitue le pilier de l'économie locale grâce à l'importance des parcours naturels. La région compte en effet plus de 28 000 têtes de bétail, composées principalement d'ovins, caprins et bovins, en plus de l'aviculture, ce qui confère au pastoralisme un rôle structurant pour les populations rurales. Parallèlement, le couvert végétal naturel, constitué d'espèces steppiques telles que l'armoise (*Artemisia herba-alba*), l'alfa (*Stipa tenacissima*) et le tamaris (*Tamarix gallica*), joue un rôle écologique fondamental dans la protection des sols contre l'érosion et la désertification. Cependant, la pression anthropique, marquée par le surpâturage, les défrichements et l'extension urbaine, accentue la dégradation de ce couvert et fragilise l'équilibre écologique.

D'après Agricole de la Wilaya de M'Sila (SAB, 2014), la complémentarité entre agriculture et élevage, Maâder se distingue comme un bassin de production stratégique dans la wilaya de M'Sila. La fertilité relative des sols, la disponibilité des ressources hydriques souterraines et la diversité des productions végétales et animales confèrent à cette région une vocation agricole dominante. Néanmoins, les contraintes liées au climat semi-aride, à la salinité des sols et des eaux, ainsi qu'à la surexploitation des ressources, rendent nécessaire

une gestion durable et intégrée pour assurer la pérennité de ce développement agricole (SAB, 2014).

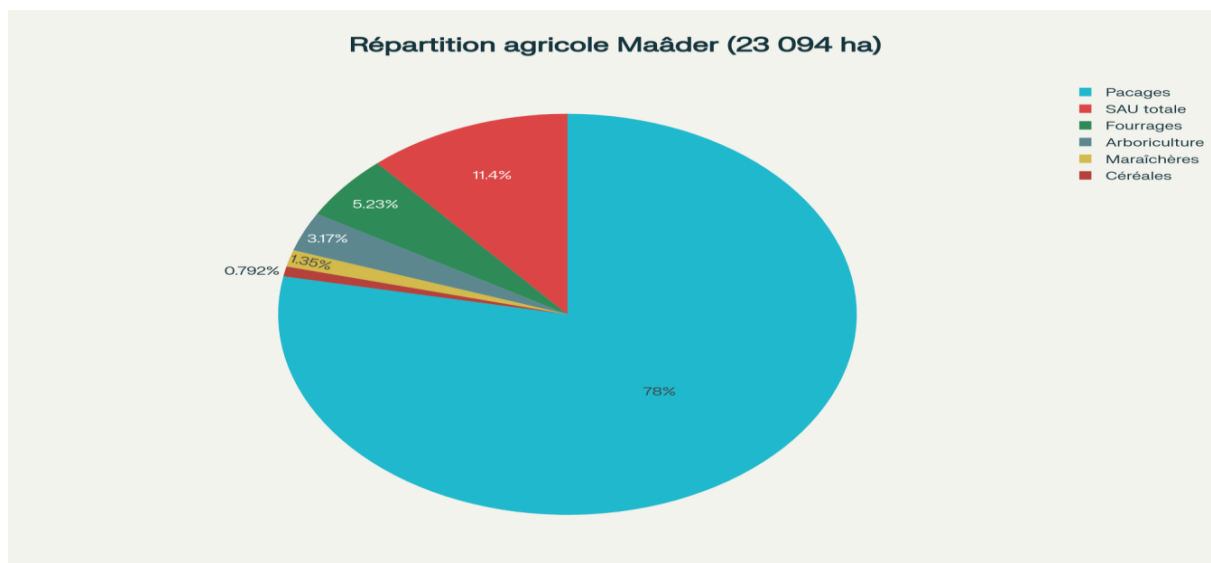


Figure 9: Répartition des superficies agricoles (village Maâder, Boussaâda). (SAB, 2014)

La surface agricole utile (SAU) ne constitue qu'environ 11%, où l'irrigation occupe une large part témoignage de la dépendance accrue vis-à-vis des ressources hydriques souterraines. Les cultures fourragères dominent largement la SAU avec près de 46%, reflétant leur importance pour l'alimentation animale et la complémentarité entre agriculture et élevage. L'arboriculture tient également une place conséquente (28%), grâce à la présence d'espèces telles que l'olivier, l'abricotier et le grenadier. Les cultures maraîchères couvrent environ 12% de la SAU, témoignant d'une diversité de production (carotte, pomme de terre, betterave, oignon, ail...). En revanche, les céréales restent marginales avec environ 7% de la SAU.

Le couvert végétal naturel, composé principalement d'espèces steppiques (armoïse, alfa, tamaris), protège efficacement les sols contre l'érosion et la désertification. Cependant, l'intensité des activités humaines (surpâturage, défrichement, urbanisation) fragilise cet équilibre écologique, accélérant la dégradation des terres.

Maâder se distingue comme un bassin agricole et pastoral stratégique dans la wilaya de M'Sila, grâce à la fertilité relative des sols et la diversité des productions. Toutefois, les contraintes climatiques, la salinité et la surexploitation imposent la mise en œuvre de pratiques de gestion durable et intégrée pour assurer la pérennité du développement agricole régional.

CHAPITRE III:

MATÉRIEL

ET

MÉTHODES

1- Présentation du site et méthodologie générale

L'étude a été menée dans la région agricole de Maâder située dans la daïra de Boussaâda, au sein de la wilaya de M'Sila, au centre-nord de l'Algérie. Cette région s'étend sur une superficie de 2984ha au Nord-Est et représente 80% des terres agricole totale et se caractérise par une activité agricole dominante, notamment la culture des légumes irrigués (pomme de terre, tomate, oignon ...etc.) et des céréales (blé dur, orge ...etc.). Le climat de la région est de type semi-aride, caractérisé par des étés très chauds (températures maximales dépassant fréquemment 35 °C) et des hivers doux. La pluviométrie moyenne annuelle est d'environ 400 mm, concentrée principalement en automne et au printemps, avec une forte variabilité interannuelle (Madani, 2023). Les sols sont majoritairement sablo-limoneux, pauvres en matière organique, à tendance calcaire, et présentent une faible capacité de rétention en eau.

Le choix du site d'étude à Maâder Boussaâda s'appuie sur sa représentativité du système agricole intensif de la région, caractérisée par une exploitation étendue, une pratique courante de traitements phytosanitaires et des sols sensibles à la dégradation.

Le plan d'échantillonnage spatial stratifié en trois parcelles et vertical en trois horizons (p1, P2, P3) offre une vision complète des variations spatiales et pédologiques du sol. Les prélèvements ont été réalisés en dehors de la saison pluvieuse, afin de minimiser l'influence de l'humidité du sol. L'étude a couvert l'ensemble du cycle cultural, depuis les opérations de préparation du sol et la plantation jusqu'à la récolte. Elle a été accompagnée d'un suivi régulier des traitements phytosanitaires appliqués. Le site d'étude est situé plus précisément dans une exploitation agricole privée localisée à Maâder à environ 5 km au sud-est de la ville de Boussaâda. Cette ferme couvre une superficie d'environ 1700 hectares et est représentative des systèmes de production intensive de la région. Elle repose essentiellement sur l'irrigation par pivot, et la succession culturale comprend principalement la pomme de terre, la tomate et diverses céréales. L'usage régulier d'engrais chimiques et de produits phytosanitaires (herbicides et fongicides) y est largement observé, ce qui en fait un terrain propice à l'étude de l'impact de ces intrants sur la qualité des sols.

Les caractéristiques agro-climatiques de cette région rendent les sols particulièrement vulnérables aux processus de dégradation, notamment en lien avec l'intensification des pratiques agricoles (Mamy et *al.*, 2017). Les sols sableux, à faible capacité de rétention en eau, sont sensibles aux altérations physico-chimiques induites par l'accumulation de résidus de pesticides et d'engrais.



Photo 1 : La zone d'étude.

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer l'effet de l'application de certains produits phytosanitaires sur les propriétés physico-chimiques de sols de cette exploitation, à travers un plan d'échantillonnage systématique. Le champ a été subdivisé en trois parcelles représentatives : l'une localisée à l'entrée du champ (Par1), la seconde au centre du champ (Par2), et la troisième à l'extrémité du champ (Par3). Dans chaque parcelle, trois campagnes de prélèvements ont été effectuées, visant des horizons de profondeur de 0-20 cm (P1), de 20-40 cm (P2) et de 40-60 cm (P3). Chaque échantillon avait une masse moyenne de 500 g, permettant une analyse complète des paramètres du sol à différentes profondeurs, conformément à la norme AFNOR.

Au total, 27 échantillons ont été collectés, suivant une approche spatio-temporelle rigoureuse. Ces prélèvements ont été réalisés avant et après l'application de deux types de traitement avec deux pesticides : un traitement avec herbicide (TH) et un traitement avec un fongicide (TF), en plus un échantillon témoin (NT), dont le but est d'évaluer l'évolution des caractéristiques du sol tout au long du profil édaphique.

2. Dispositif expérimental :

Chaque traitement (TH, TF et NT) a été représenté par neuf échantillons, soit un total de 27 échantillons. Chaque prélèvement a été effectué à l'aide d'une tarière Edelman, puis stocké dans des sacs stériles codés selon la parcelle, la profondeur et le type de traitement. Les échantillons ont ensuite été transférés au laboratoire pour des analyses physico-chimiques approfondies, réalisées selon la norme AFNOR (Afnor, 1996).

Le but principal de l'étude est d'évaluer l'impact des pesticides sur les propriétés physico-chimiques du sol. Deux étapes de traitement phytosanitaire sont prises en compte : la première concerne l'application d'un herbicide; le Gallant Super, utilisé contre les mauvaises herbes, tandis que la seconde consiste en un traitement fongicide avec le Consentio, destiné à lutter contre le mildiou, un champignon affectant les cultures de la pomme de terre.

Etude des sols Maâder Boussaâda.

Échantillonnage et prélèvement.

Trois parcelles ont été réalisées au début, au milieu et à la fin de la zone agricole
trois profondeurs verticales ont été échantillonnées dans chaque parcelle (P1, P2, P3).

Trois types d'échantillons ont été prélevés (NT, TH, TF), pour un total de 27 échantillons.



Préparation des échantillons

- Transport en sacs stériles codés
- Séchage à 105 °C
- Tamisage à 2 mm
- Pesée (~500 g)
- Étiquetage et traçabilité



Analyses physico-chimiques et minérales

- pH, CE (multiparamètre HiN 9829)
- MO, CO (Walkley & Black, 1934)
- Teneur calcaire (Bernard)
- Ca^{2+} , Mg^{2+} (EDTA)
- NO_2 , P_2O_5 , K_2O (XRF)
- Métaux lourds (Fe_2O_3 , Cu, CrO_3) (XRF)

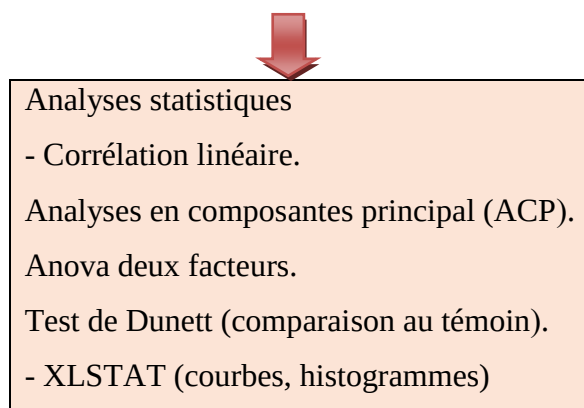


Figure 10: Schéma récapitulatif du dispositif expérimental et des étapes analytiques en laboratoire.

2.1. Préparation et traitement des échantillons :

Tous les échantillons ont été séchés à l'étuve à 105°C pour éliminer l'humidité, puis tamisés à 2 mm pour homogénéiser la granulométrie. Chaque échantillon (environ 500 g) est soigneusement pesé, étiqueté et stocké. Des précautions strictes sont prises pour éviter toute contamination croisée entre les échantillons.

Le matériel utilisé est stérilisé entre chaque série de prélèvements. Un registre de traçabilité a été mis en place pour suivre chaque échantillon depuis le terrain jusqu'aux résultats d'analyse. Le respect des protocoles normalisés d'échantillonnage, de préparation et d'analyse des échantillons permet d'obtenir des résultats fiables, précis et reproductibles. (Pansu et *al.*, 1999).

2.2. Méthodes analytiques :

Les analyses physico-chimiques réalisées sur les échantillons de sol ont permis de caractériser plusieurs paramètres essentiels à l'évaluation de la qualité des sols agricoles. L'ensemble des analyses a été effectué conformément aux protocoles standards décrits par Pauwels et *al.*, (1995) et Mathieu et *al.*, (2003). Les différentes méthodes appliquées sont détaillées ci-dessous :

- **Mesure du pH:**

Le pH du sol, indicateur fondamental de l'acidité ou de l'alcalinité du milieu, a été déterminé dans une suspension sol-eau à l'aide d'un appareil multi-paramètre de type HIN 9829, conformément à la méthode standard de mesure du pH des sols.

- **Conductivité électrique (CE):**

La CE a été mesurée dans la même suspension que pour le pH, à l'aide du même appareil. Elle renseigne sur la concentration en ions dissous dans la solution du sol et constitue un indicateur indirect de la salinité. Elle est exprimée en $\mu\text{S}/\text{cm}$.

- **Salinité et solides dissous totaux (TDS):**

Ces deux paramètres, également mesurés à l'aide du multi-paramètre HIN 9829, permettent d'estimer la quantité totale de sels dissous dans le sol, influençant la croissance des plantes et la structure du sol. Les TDS sont exprimés en mg/l .

- **Carbone organique (CO) et matière organique (MO):**

Le carbone organique a été déterminé par la méthode de Walkley et Black (1934), basée sur l'oxydation du carbone organique par le bichromate de potassium en milieu acide. Ce dosage est fondamental pour évaluer la fertilité du sol et sa capacité à retenir les nutriments et de l'eau. La teneur en matière organique a ensuite été estimée à partir du carbone organique, en utilisant le facteur de conversion classique ($\text{MO} = \text{CO} \times 1,72$).

L'ensemble de ces analyses a été réalisé dans un environnement de laboratoire contrôlé, avec des échantillons prélevés à différentes profondeurs afin d'évaluer l'impact vertical des traitements phytosanitaires sur les propriétés physico-chimiques du sol.

- **Calcaire total :**

Le calcaire total a été déterminé à l'aide du calcimètre de Bernard, qui repose sur le principe de la libération du dioxyde de carbone (CO_2) par réaction entre les carbonates du sol et l'acide chlorhydrique (HCl). Cette réaction produit un dégagement de CO_2 proportionnel à la teneur en carbonate de calcium (CaCO_3) présent dans l'échantillon. Le volume de gaz dégagé est ensuite mesuré pour estimer la teneur en calcaire total (Denis, 2000).

- **Calcium (Ca^{+2}) et Magnésium (Mg^{+2}) :**

Déterminés par titration avec EDTA 0,01 N (Mathieu *et al.*, 2003).

- **Éléments nutritifs et métaux lourds analyses :**

Les éléments analysés incluent le phosphore (P_2O_5), le potassium (K_2O), l'azote sous forme de nitrites (NO_2^-), ainsi que plusieurs métaux lourds tels que le fer (Fe_2O_3), l'aluminium (Al_2O_3), le chrome (Cr_2O_3), le manganèse (Mn_2O_3) et le cuivre (Cu).

Ces éléments ont été déterminés par la technique de fluorescence des rayons X (X-Ray Fluorescence, XRF), réalisée au laboratoire Lafarge de M'Sila. Il s'agit d'une méthode rapide, non destructive et multi-élémentaire, largement utilisée pour la caractérisation chimique des matériaux solides tels que les sols, les roches et les ciments.

Dans le cadre de cette étude, la fluorescence X a permis de mesurer les teneurs en phosphore (P_2O_5) et en potassium (K_2O), deux éléments nutritifs majeurs pour les plantes.

L'analyse XRF constitue ainsi un outil efficace pour évaluer la contamination potentielle du sol par des métaux lourds et pour suivre les variations de la composition chimique globale du sol en lien avec les traitements phytosanitaires. Certains pesticides ou engrais contiennent des impuretés métalliques et avec le temps, leur usage peut entraîner une accumulation de métaux toxiques dans le sol.

3. Travail expérimental :

3.1. Analyse du pH, de la CE, de la salinité et des TDS :

Ces paramètres ont été mesurés à l'aide d'un appareil multi paramètre (HIN 9829). La méthode consiste à préparer une suspension du sol dans de l'eau déminéralisée : (Mathiau et al., 2003).

- Peser 20 g de sol séché (< 2 mm) et les introduire dans un bécher.
- Ajouter 50 ml d'eau déminéralisée.
- Agiter une minute à l'aide d'une baguette de verre.
- Laisser reposer pendant 2 heures.
- Plonger les électrodes dans le surnageant pour mesurer le pH, la CE, la salinité et les TDS après stabilisation de la lecture.

3.2. Dosage de la matière organique (MO) et du carbone organique (CO) :

La détermination de la matière organique du sol a été réalisée selon la méthode de Walkley et Black (1934), qui repose sur l'oxydation du carbone organique (CO) à l'aide de bichromate de potassium ($K_2Cr_2O_7$) en présence d'acide sulfurique concentré (H_2SO_4). Cette méthode est largement utilisée pour estimer indirectement la teneur en matière organique (MO) à partir de la mesure du carbone organique oxydable.

- Peser 2 g de sol finement broyé, séché à l'air et tamisé à 2 mm.
- Ajouter un excès de solution de bichromate de potassium ($K_2Cr_2O_7$) et d'acide sulfurique concentré pour provoquer l'oxydation du carbone organique présent dans l'échantillon.
- Après la réaction, la quantité de bichromate non réagi (résiduel) est titrée par une solution de sel de Mohr ($FeSO_4$), un réducteur doux, afin de déterminer par différence la quantité de carbone oxydé.

➤ Le carbone organique (CO):

Le carbone organique est la partie du carbone présente dans la matière organique du sol (résidus végétaux, micro-organismes, etc.). Il est déterminé par la méthode de Walkley et

Black (1934), qui repose sur l'oxydation chimique du carbone par une solution de bichromate de potassium.

➤ **La matière organique (MO):**

La matière organique est généralement estimée à partir du carbone organique, puisqu'elle en est constituée en grande partie. Selon Van Bemmelen, la MO contient environ 58 % de CO, ce qui correspond à un facteur de conversion de 1,72.

La relation est donnée par la formule :

$$\text{MO (\%)} = \text{CO (\%)} \times 1,72$$

Où 1 g de MO $\approx$ 0,58 g de CO.

Ce facteur est approximatif, mais il est largement utilisé en pédologie pour estimer la teneur en matière organique à partir du carbone organique.

Remarque : cette méthode n'oxyde pas la totalité du carbone organique présent (rendement estimé à ~75–80 %), mais elle reste néanmoins fiable pour des comparaisons entre échantillons dans des conditions expérimentales constantes.

Par ailleurs, une estimation visuelle rapide peut également être envisagée : un sol de couleur sombre indique en général une teneur plus élevée en matière organique, tandis qu'un sol clair en est généralement pauvre.

3.3. Détermination du calcaire total :

La teneur en calcaire total est déterminée par la méthode du calcimètre de Bernard, basée sur la réaction entre le carbonate de calcium (CaCO_3) contenu dans le sol et l'acide chlorhydrique (HCl). Cette réaction libère du dioxyde de carbone gazeux (CO_2).



- Prélever 2 g de sol préalablement tamisé à 2 mm.
- Introduire l'échantillon dans une fiole à doigt.
- Ajouter l'acide chlorhydrique (HCl).
- Mesurer le volume de CO_2 dégagé à l'aide d'un calcimètre, ce qui permet de calculer la teneur en calcaire total.

3.4. Dosage du calcium et du magnésium :

Le calcium (Ca^{2+}) et le magnésium (Mg^{2+}) sont déterminés par titration complexométrique à l'EDTA (0,01 N).

Principe:

- Le calcium est titré directement à pH $\approx$ 12 (milieu alcalin).
- Le calcium + magnésium sont titrés ensemble (titrage total des cations divalents).
- La teneur en magnésium est obtenue par différence entre les deux mesures.



Préparation d'une suspension sol-eau pour les analyses



Dosage du calcaire total



Préparation des solutions



Dosage de la matière organique

Figure 11: Préparation des échantillons pour les analyses physico chimiques.



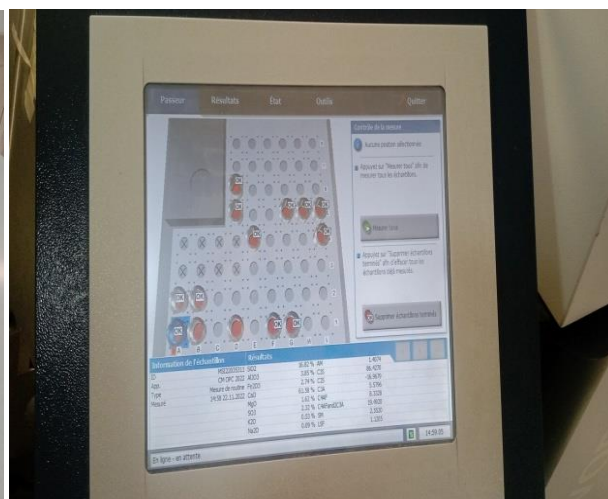
(a) pH-mètre utilisé pour l'analyse du PH
Pour analyse élémentaire en laboratoire



(b) Spectromètre à fluorescence X (XRF)



(c) Pastilles d'échantillons prêtes pour
XRF échantillons de sol sous forme de tableau

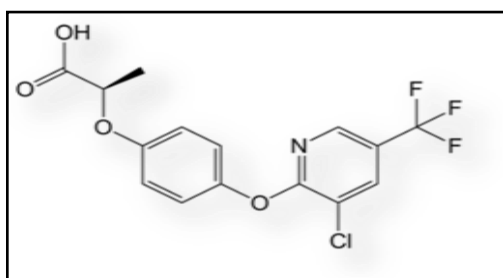


(d) XRF affichant les résultats des analyse

Figure 12: Appareils et préparations pour l'analyse du sol par pH-mètre et spectrométrie XRF

Tableau 11: Fiche technique de l'herbicide : Gallant super.

Rubrique	Détails
Nom commercial	Gallant Super
Substance active	Haloxypop-R-méthyl (ou Haloxypop-R-méthyl ester)
Formule chimique	$C_{16}H_{13}ClF_3NO_4$
Poids moléculaire	375.73 g/mol
Famille chimique	Aryloxyphénylpropionates (groupe des FOPs) - Inhibiteur de l'ACCCase
Type de produit	Herbicide systémique sélectif contre les graminées
Mode d'action	Inhibe l'enzyme ACCCase, arrêtant la biosynthèse des acides gras essentiels à la croissance des graminées. Absorbé par les feuilles, il est transloqué dans toute la plante.
Propriétés physico-chimiques	- Forme : Liquide (concentré émulsionnable) - Solubilité dans l'eau : ~0.4 mg/L - log Kow : 4.2 (lipophile) - DT50 : 7 à 30 jours - Point de fusion : N/A - Pression de vapeur : Très faible
Toxicité et sécurité	- DL50 orale : > 5000 mg/kg - Faible toxicité pour oiseaux - Moyenne à élevée pour poissons - Faible pour les abeilles - Biodégradabilité : Moyenne
Précautions d'utilisation	Éviter ruissellement, respecter les doses, porter EPI (équipements de protection individuelle)
Avantages	- Efficace contre de nombreuses graminées - Compatible avec cultures dicotylédones - Action post-émergence - Lutte intégrée
Inconvénients	- Inefficace contre dicotylédones - Risque de résistance - Moins efficace sur graminées développées



Matière active : Haloxypop-méthyl ester

Nomenclature IUPAC :

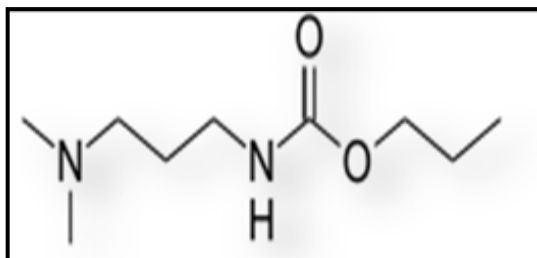
Méthyl 2-[4-[3-chloro-5-(trifluorométhyl)-2-pyridyloxy]phénoxy]propionate

Formule brute : $C_{16}H_{13}ClF_3NO_4$

Masse molaire : 375.73 g/mol

Tableau 12: Fiche technique de fongicide : Consentó.

Critère	Description
Nom commercial	Consento
Type de produit	Fongicide
Formulation	Propamocarbe : $C_9H_{20}N_2O_2$ Fenamidone : $C_{17}H_{17}N_3OS$
Substances actives	- Propamocarbe HCl (375 g/L) - Fenamidone (75 g/L)
Famille chimique	- Propamocarbe : Carbamates - Fenamidone : Quinone à action respiratoire
Mode d'action	Systémique et translaminaire
Cibles principales	- Mildiou de la pomme de terre (<i>Phytophthora infestans</i>) - Mildiou de la tomate
Cultures concernées	- Pomme de terre - Tomate
Dose d'application	En général 2 L/ha (à adapter selon la culture et le stade)
Fréquence d'utilisation	Tous les 7 à 10 jours (max 3 applications par cycle selon réglementation)
Temps de réentrée (REI)	48 heures (variable selon législation)
Délai avant récolte (DAR)	Environ 7 jours (à vérifier selon culture et législation locale)
Précautions d'usage	- Porter des EPI (gants, masque...) - Ne pas traiter en plein vent - Éviter le ruissellement
Toxicité	Modérée à élevée pour les organismes aquatiques - respect des zones non traitées -

**Fenamidone :**Formule chimique : $C_{17}H_{17}N_3OS$

Nom IUPAC : (S)-3-anilino-5-méthyl-2-méthylsulfanyl-5-phenylimidazol-4-one

Propamocarbe :Formule chimique : $C_9H_{20}N_2O_2$

Nom IUPAC : propyl [3-(diméthylamino)propyl]carbamate

4. Classification des pesticides et choix des molécules étudiées d'après l'OMS (2020)

Le tableau 12 présente les pesticides les plus couramment utilisés par les ouvriers agricoles, classés selon leur famille chimique, leur fréquence d'utilisation et leur toxicité d'après la classification de l'OMS (2020). Ce tableau met en évidence la prédominance des fongicides (50 %) et des insecticides (43 %), suivis des herbicides (4 %) et des acaricides (3 %). La diversité des substances actives illustre la forte dépendance des systèmes agricoles aux intrants chimiques pour le contrôle des maladies, des ravageurs et des mauvaises herbes.

Dans le cadre de notre étude, deux molécules issues de ce classement attirent particulièrement l'attention :

- **Le Propamocarbe**, appartenant à la famille des carbamates, classé « U » (peu susceptible de présenter un danger aigu en usage normal). C'est un fongicide systémique largement utilisé contre les oomycètes (ex. *Phytophthora*, *Pythium*). Bien que faiblement classé en termes de toxicité immédiate, son usage répété peut perturber l'équilibre biologique du sol, notamment la microflore impliquée dans la dégradation de la matière organique.
- **Le Haloxyfop-R**, un herbicide sélectif de la famille des organophosphorés, classé « II » (modérément dangereux). Utilisé principalement contre les graminées, il agit par inhibition de l'*acetyl-CoA carboxylase*, ce qui limite la croissance des mauvaises herbes. Ce mode d'action, s'il favorise le maintien des cultures, peut néanmoins influencer indirectement le cycle du carbone et de l'azote en modifiant la quantité et la qualité des résidus organiques restitués au sol.

Ainsi, ce tableau constitue une base de référence indispensable pour comprendre la place des deux pesticides étudiés (Gallant Super contenant Haloxyfop-R et Consentio contenant Propamocarbe) dans le paysage phytosanitaire local, et pour interpréter leur impact différencié sur les propriétés physico-chimiques et biologiques des sols agricoles de Maâder Boussaâda.

4- Analyse des éléments par fluorescence X (XRF) :

Les échantillons sont oxydés à haute température, puis fondus avec un fondant spécifique dans un creuset en platine ou graphite. Le mélange fondu est moulé en disque de verre pour l'analyse XRF. Cette méthode permet une analyse quantitative rapide des éléments majeurs et traces présents dans le sol (Bachmann et *al.*, 2009).

4.1. Traitement statistique des données :

Une Analyse en Composantes Principales (ACP) est appliquée entre les paramètres physico-chimiques : pH, salinité, TDS, CE, MO, CO, Cal, Ca^+ , Mg^{++} , N, P, K et C/N afin de ressortir toutes les relations possibles au sein des variables.

Une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) est appliquée pour objectif d'identifier le nombre et la composition de chaque groupe homogène de types de sols.

La normalité est vérifiée par le test de Shapiro-Wilk à travers tous les paramètres physico-chimiques testés afin de choisir le bon test.

Application du test ANOVA à deux facteurs au seuil de $P \leq 0,05$ afin d'étudier l'effet de deux facteurs : type du sol (sol témoin, sol traité par herbicide et sol traité par fongicide), profondeur (0-20cm, 20-40cm et 40-60cm) ainsi que l'interaction type du sol $\times$ profondeur sur les 13 paramètres physico-chimiques proposés. Lors de la détermination des différences significatives, le test post hoc Dunnett est appliqué pour comparer les deux modalités du sol (sol traité par herbicide et sol traité par fongicide) avec la modalité témoin non traité après la vérification de l'homogénéité des variances par le test de Levene.

Toutes les méthodes statistiques et les représentations graphiques ont été traitées par le logiciel statistique SPSS version 27 (IBM SPSS, 2020).

CHAPITRE IV:

RÉSULTATS

ET

DISCUSSION

I. Résultats

1. Les paramètres physico-chimiques du sol

Afin d'atteindre l'objectif principal de notre recherche, qui consiste à suivre et à évaluer les effets des pesticides sur les paramètres physico-chimiques de sols agricoles dans une région aride, nous avons obtenu une série de résultats synthétisés dans les tableaux (13, 14, et 15). Ces derniers permettent de comparer le sol non traité (NT) à celui traité par un herbicide (TH) ; le Gallant Super et celui traité par un fongicide (TF) ; le Consentio, Dans les différentes profondeurs de prélèvement. Les valeurs moyennes, maximales et minimales mettent en évidence des tendances générales : une alcalinité marquée dans l'ensemble des échantillons, une variabilité notable de la salinité, de la conductivité électrique et des solides dissous totaux, ainsi que des différences significatives dans les teneurs en matière organique, en calcaire total et en éléments nutritifs (N, P, K). L'importance de ces résultats réside dans leur capacité à révéler l'impact différentiel des traitements chimiques sur la fertilité et l'équilibre du sol, fournissant ainsi une base d'interprétation essentielle, pour la compréhension des dynamiques pédologiques sous l'effet des pesticides.

1.1. Échantillons sans traitement (Témoins)

Les échantillons de sol non traité (NT) servent de référence essentielle pour évaluer l'impact des traitements chimiques sur les paramètres physico-chimiques de sol. Ces échantillons permettent de caractériser l'état initial de la zone d'étude, en termes de pH, de salinité, de conductivité électrique, de matière organique et de nutriments, Ils reflètent les conditions environnementales de la région semi-aride et à sols sablo-limoneux, et constituent une base de comparaison quant aux effets des herbicides et des fongicides sur la fertilité et la qualité chimique du sol.

Tableau 13: Résultats des paramètres physico-chimiques du sol non traités dans les différentes profondeurs.

Les paramètres		PH	Salinité	TDS (mg/L)	CE (µs/cm)	MO %	CO %	Cal %	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	N %	P %	K %	C/N
Parcell	Profondeur													
Par1	P1	8.16	0.01	228.00	345.00	1.60	0.93	3.50	5.36	0.30	0.26	2.25	3.40	3.58
	P2	8.38	0.01	192.90	287.00	0.42	0.25	2.41	3.27	0.25	0.28	1.22	3.39	0.88
	P3	8.45	0.03	176.30	263.00	0.50	0.29	2.87	3.23	0.25	0.28	1.40	1.60	1.04
Par2	P1	8.51	0.01	134.50	200.00	0.76	0.44	4.59	3.65	0.15	0.55	2.33	2.54	0.80
	P2	8.45	0.02	150.90	228.00	1.81	1.05	5.02	4.01	0.15	0.54	1.06	1.58	1.94
	P3	8.45	0.01	163.00	243.00	1.43	0.83	3.83	3.11	0.30	0.63	0.35	1.55	1.32
Par3	P1	8.25	0.02	269.00	407.00	1.35	0.78	6.37	4.23	0.30	0.32	0.14	0.63	2.38
	P2	8.41	0.03	460.00	693.00	2.19	1.27	6.32	4.62	0.15	0.34	0.39	0.66	3.75
	P3	8.58	0.03	129.00	193.00	1.56	1.49	5.11	3.12	0.20	0.35	0.39	0.71	4.26
Moyenne		8.40	0.02	193.85	317.66	1.12	0.82	4.44	3.85	0.23	0.39	1.06	1.79	2.22
Max		8.58	0.03	460.00	693.00	2.56	1.49	6.37	5.36	0.50	0.63	2.33	3.40	4.26
Min		8.25	0.01	129.00	193.00	0.42	0.25	2.41	3.12	0.15	0.11	0.35	0.63	0.80

D'après le tableau ci-dessus, l'analyse des sols non traités (NT) met en évidence un caractère globalement alcalin, avec des valeurs de pH comprises entre 8,16 et 8,58, pour une moyenne de 8,40. La salinité reste faible (0,01–0,03). De manière concordante, les teneurs en solides dissous totaux (129–460 mg/L, moyenne : 193,85 mg/L) ainsi que la conductivité électrique (193–693 µS/cm) se maintiennent à des niveaux relativement bas. Sur le plan organique, les teneurs en matière organique et en carbone organique demeurent faibles, avec respectivement 1,11 % et 0,81 %.

Concernant le calcaire total, il varie de 2,41 % à 6,37 % avec une moyenne de 4,44 %, tandis que les teneurs en Ca²⁺ sont relativement élevées (moyenne : 3,85 mg/L), contrairement au Mg²⁺, qui reste faible (moyenne : 0,23 mg/L). Enfin, les éléments nutritifs sont disponibles en quantité restreinte : l'azote (0,11 à 0,63 %, moyenne : 0,23 %), le phosphore (moyenne : 1,06 %), qui montre une forte variabilité entre les échantillons non traités (NT) et les sols traités (TH, TF) avec des implications importantes pour la gestion nutritive et la fertilisation ciblée, et enfin le potassium (moyenne : 1,79 %), qui présente une large dispersion indiquant une variation importante entre les échantillons. Le rapport C/N est compris entre 0,80 et 4,26, avec une moyenne avoisinant 2,22.

1.2. Echantillons traités par l'herbicide Gallant Super (TH)

Les échantillons traités par le Gallant Super permettent d'évaluer l'impact direct de ce produit chimique sur les paramètres physico-chimiques du sol. Ces analyses fournissent des informations sur les modifications possibles du pH, de la salinité, de la matière organique, du calcium échangeable et des éléments nutritifs après application de l'herbicide. L'étude réalisée à différentes profondeurs (P1 : 0–20 cm, P2 : 20–40 cm, P3 : 40–60 cm) met en évidence l'influence potentielle du traitement herbicide sur la distribution des nutriments et la composition chimique du sol. Cette analyse est essentielle pour comprendre l'impact de l'herbicide sur la fertilité et la qualité chimique du sol dans la zone étudiée.

Tableau 14: Résultats des paramètres physico-chimiques du sol traité par l'herbicide (TH) dans les différentes profondeurs.

Paramètres		pH	Salinité	TDS (mg/L)	CE μS/cm	MO %	CO%	Ca%	Ca ²⁺ (Mg /L)	Mg ²⁺ (Mg/L)	N%	P%	K%	C/N
Parcelle	Profondeur													
Par1	P1	8.43	0.04	486	723	3.87	2.27	5.94	3.58	0.20	1.18	2.84	3.71	1.92
	P2	8.52	0.02	373	559	3.78	2.20	5.45	3.69	0.15	1.23	1.90	3.39	1.78
	P3	9.11	0.04	308	307	2.61	1.52	5.75	3.86	0.20	1.01	1.41	2.14	1.50
Par2	P1	8.56	0.01	220	314	3.64	2.12	8.53	4.32	0.15	1.33	2.12	2.23	1.59
	P2	9.10	0.01	329	343	2.66	1.55	8.67	4.52	0.10	1.15	2.01	2.20	1.34
	P3	9.10	0.02	320	426	3.61	2.10	6.09	4.64	0.15	1.21	2.78	2.23	1.73
Par3	P1	8.78	0.10	177.8	305.2	2.21	1.29	6.09	4.36	0.15	1.01	2.44	2.16	1.28
	P2	9.10	0.01	160	298.1	2.54	1.38	5.59	3.33	0.15	1.87	1.20	1.23	0.79
	P3	9.12	0.01	186	200	2.23	1.39	4.87	3.02	0.20	1.56	1.32	1.62	0.89
Moy		8.86	0.048	284.4	386.1	3.01	1.74	6.3	3.92	0.14	1.28	2.00	2.32	1.42
MAX		9.12	0.04	486	723	3.87	2.27	8.67	4.64	0.20	1.87	2.84	3.71	1.92
MIN		8.43	0.01	160	200	2.21	1.29	4.87	3.02	0.10	1.01	1.20	1.23	0.79

Le tableau ci-dessus présente les résultats des analyses physico-chimiques des sols traités par l'herbicide (TH) à différentes profondeurs. P1 (0-20 cm), P2 (20-40 cm) et P3 (40-60 cm). On observe que le pH demeure alcalin avec des valeurs comprises entre 8,43 et 9,12, et une moyenne relativement élevée (8,86). La salinité varie de 0,01 à 0,10, légèrement supérieure à celle des échantillons non traités (NT). Les solides dissous totaux (TDS) fluctuent entre 160 et 486 mg/L, une moyenne de 284,4 mg/L, confirmant une minéralisation plus importante que dans les échantillons des sols non traités (NT). La conductivité électrique (200–723 μS/cm, d'une moyenne de 386,1 μS/cm) suit la même tendance que les TDS.

Concernant la matière organique (MO), les teneurs sont nettement plus élevées, avec une moyenne de 3,01 %, de même que le carbone organique (1,74 % en moyenne). Le calcaire total varie entre 4,87 et 8,67 % (moyenne : 6,3 %), également plus élevé que dans les échantillons de sols non traités (NT), indiquant une accumulation calcaire notable. Les teneurs en calcium, avec une moyenne de 3,92 mg/L, sont comparables à celles des échantillons non traités (NT), tandis que le magnésium reste faible, avec une moyenne de 0,14 mg/L.

D'un point de vue nutritif, les sols (TH ; Gallant Super) présentent des teneurs accrues en azote (moyenne : 1,28 %), en phosphore (2,00 %) et en potassium (2,32 %), confirmant un enrichissement nutritif par rapport aux échantillons (NT). Le rapport C/N, compris entre 0,79 et 1,92, présente une moyenne de 1,42.

1.3. Echantillons traités par un fongicide (TF) le Consent.

Les échantillons traités par le fongicide (TF) permettent d'évaluer l'effet spécifique des fongicides sur les paramètres physico-chimiques du sol. L'analyse des différentes profondeurs fournit des indications sur les modifications potentielles du pH, de la salinité, de la matière organique, du calcaire et des éléments nutritifs. Ces informations sont essentielles pour comprendre comment l'application du fongicide influence la fertilité et la qualité chimique du sol par rapport à l'état initial, représenté par les échantillons non traités (NT), et pour comparer les impacts des différents types de pesticides dans la zone d'étude.

Tableau 15: Résultats des paramètres physico-chimiques du sol traité par le fongicide (TF) dans les différentes profondeurs.

Paramètre		pH	Salinité	TDS(mg/L)	CE μ S/cm	MO%	CO%	Cal%	Ca ⁺⁺ (Mg/L)	Mg ⁺⁺ (Mg/L)	N%	P%	K%	C/N
Parcelle	Profondeur													
Par1	P1	8.63	0.02	324	492,00	0.42	0.24	2,00	3.14	0.20	0.22	0.64	0.54	1.11
	P2	8.59	0.03	356	528,00	1.43	0.83	3.50	3.75	0.30	0.31	0.50	0.53	2.69
	P3	8.71	0.01	212	315,00	1.26	0.73	2,00	3.07	0.25	0.33	0.24	0.44	2.22
Par2	P1	8.90	0.01	78.4	113.4	1.09	0.64	1.50	2.65	0.15	0.63	0.62	0.87	1.01
	P2	8.96	0.01	103.4	158,00	0.67	0.39	2,00	2.36	0.20	0.80	0.66	0.66	0.49
	P3	9.97	0.02	107.1	160,00	1.26	0.73	1.50	2.01	0.20	1.08	1.01	0.54	0.68
Par3	P1	9.10	0.01	96.5	104,00	1.43	0.83	3,00	3.00	0.20	0.30	0.52	0.14	2.78
	P2	8.86	0.03	91.3	135.90	1.09	0.64	3.50	2.21	0.15	1.00	0.13	0.12	0.64
	P3	9.10	0.03	127.2	189.40	0.84	0.49	2,28	1.12	0.20	1.10	0.32	0.90	0.44
Moy		8.98	0.01	166.2	243.96	1.06	0.61	2.36	2.59	0.20	0.64	0.51	0.53	1.34
MAX		8.97	0.03	356	528,00	1.43	0.83	3.5	3.75	0.3	1.08	1.01	0.87	2.69
MIN		8.59	0.01	69.5	104.5	0.42	0.24	1.5	1.12	0.15	0.22	0.13	0.12	0.64

Le tableau ci-dessus présente les résultats des analyses physico-chimiques des sols traités par le fongicide (TF), à savoir le Consent, aux différentes profondeurs : P1 (0-20 cm), P2 (20-40 cm) et P3 (40-60 cm). On constate que le pH reste alcalin, avec des valeurs comprises entre 8,59 et 9,10 et une moyenne de 8,98, indiquant une légère tendance à l'alcalinisation par rapport aux échantillons non traités (NT). La salinité demeure faible (0,01–0,03), proche de celle observée dans les sols non traités (NT). Les TDS varient entre 91 et 356 mg/L, avec une moyenne de 166,2 mg/L, et la conductivité électrique oscille entre 104 et 528 μ S/cm, avec une moyenne de 243,9 μ S/cm.

Concernant la matière organique, les valeurs restent basses, avec une moyenne de 1,05 %, de même que le carbone organique (0,61 %). Le calcaire total présente des valeurs comprises entre 1,5 et 3,5 %, avec une moyenne de 2,36 %, inférieures à celles observées dans le sol non traité (NT) et dans les sols traités par l'herbicide (TH), tandis que les teneurs en Ca^{2+} (2,59 mg/L en moyenne) et en Mg^{2+} (0,21 mg/L) restent faibles.

Au niveau des éléments nutritifs, les résultats montrent des teneurs limitées en azote (0,15–0,30 %, avec une moyenne de 0,20 %), tandis que le phosphore est relativement plus élevé (0,22–1,08 %, avec une moyenne de 0,64 %). En revanche, le potassium demeure faible (0,13–1,01 %, avec une moyenne de 0,51 %). Le rapport C/N varie de 0,64 à 2,68, avec une moyenne de 1,33.

2- Les éléments chimiques toxique et éléments traces dans le sol de la zone d'étude.

2. 1 Echantillons des éléments chimiques toxiques dans le sol (Oxydes majeurs et éléments traces (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 , Cr_2O_3 , Mn_2O_3 , Cu) dans les sols de la zone d'étude.

Les oxydes majeurs (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 , Cr_2O_3 , Mn_2O_3) ainsi que les éléments traces, tels que le cuivre (Cu), représentent des indicateurs essentiels pour la caractérisation chimique et minéralogique des sols. Leur analyse offre la possibilité de mettre en évidence l'influence des pesticides sur la stabilité chimique et sur le potentiel de fertilité des sols. Dans la zone d'étude, les sols se distinguent par une forte prédominance en SiO_2 , ce qui traduit une texture sablo-limoneuse relativement légère et appauvrie en éléments fins. Les teneurs en Al_2O_3 et Fe_2O_3 demeurent globalement faibles, mais présentent une tendance à l'augmentation dans les sols traités par l'herbicide Gallant Super (TH), tandis que TiO_2 et Cr_2O_3 se maintiennent à des concentrations stables et faibles.

Le Mn_2O_3 présente des valeurs modérées, accompagnées d'un enrichissement ponctuel observé dans certaines parcelles. Tandis que le cuivre, en tant qu'élément trace, demeure globalement faible, restant inférieur aux seuils critiques. Ces résultats mettent en évidence la faible disponibilité en éléments fertilisants et soulignent la pertinence de ces analyses pour appréhender les impacts potentiels des traitements chimiques sur la qualité des sols.

Tableau 16: Les éléments chimiques toxiques dans les sols de la zone d'étude.

Paramètre	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	TiO ₂ %	Cr ₂ O ₃	Mn ₂ O ₃	Cuivre%
Echantillon							
Par1 TF	78,34	2,06	0,81	1.46	0.50	0.16	0,04
Par2TF	91,001	2,56	0,78	1.36	0.30	0.13	0,02
Par3TF	83,54	1,58	0,69	1.22	0.30	0.13	0,03
Par1TH	83,26	2,49	1,86	1.29	0.20	0.32	0,02
Par2 TH	68,11	2,13	2,36	1.33	0.17	0.40	0,01
Par3 TH	86,31	2,26	2,66	1.11	0.26	0.72	0,01
Par 1NT	89,20	1,15	0,71	0.93	0.42	0.10	0,01
Par2NT	93,29	1,03	0,79	0.57	0.64	0.13	0,06
Par3NT	84,80	1,78	0,75	0.60	0.65	0.14	0,01
		0-20ppm	20100 ppm	PBT	0.5-20ppm	20- 50ppm	2-40ppm

L'analyse des éléments chimiques toxiques (Tableau 16) révèle que la composition minéralogique du sol étudié est largement dominée par la silice (SiO₂), avec des teneurs comprises entre 68 % et 99 %, ce qui traduit la nature sablo-limoneuse et quartzique, typique des sols de zones semi-arides. Les teneurs en alumine (Al₂O₃) et en oxyde de fer (Fe₂O₃) demeurent globalement faibles, mais une augmentation du Fe₂O₃ est observée dans les parcelles traitées. De même, les concentrations en TiO₂ et en Mn₂O₃ apparaissent plus élevées dans les sols traités par rapport aux échantillons non traités (NT). En revanche, les teneurs en Cr₂O₃ ne présentent pas de tendance claire, certains échantillons (NT) montrant même des valeurs supérieures. Pour le cuivre (Cu), les valeurs demeurent très faibles et s'avèrent légèrement plus élevées dans les sols (NT).

Dans l'ensemble, ces résultats suggèrent que l'application des pesticides entraîne une redistribution différentielle des éléments traces, avec un effet marqué sur le fer, le manganèse et le titane, tandis que le chrome et le cuivre semblent faiblement influencés.

3. Les variations des paramètres physico-chimiques en fonction du traitement et de la profondeur

3.1 Variation de PH

L'examen du pH met en évidence une variation conjointe des effets du traitement et de la profondeur. À P1 (0–20 cm), les échantillons non traités présentent le pH le plus faible. Une hausse est observée dans les échantillons traités par l'herbicide (TH), et un maximum est

atteint avec les échantillons traités par le fongicide (TF). À P2 (20–40 cm), les valeurs du sol (NT) et du sol (TH) sont proches et supérieures à celles des sols (TF). Enfin, à P3 (40–60 cm), le pH le plus élevé est enregistré pour les sols (TH), tandis que les sols (NT) et les sols (TF) affichent des niveaux plus faibles et comparables.

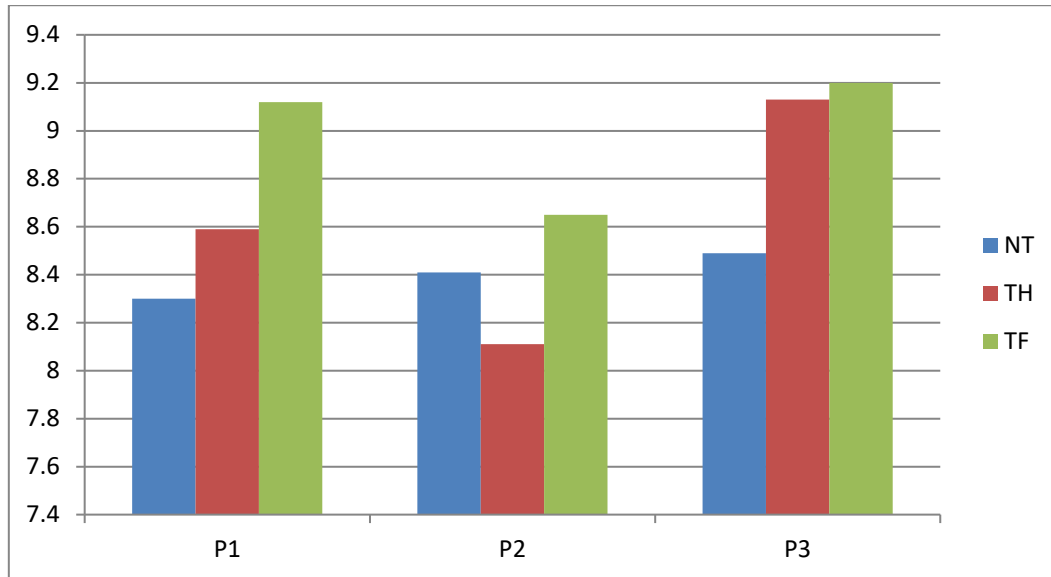


Figure 13: Variations du pH selon le traitement et la profondeur.

3.2 Salinité (CE, TDS).

L'évolution de la salinité du sol. La salinité varie conjointement avec le traitement et la profondeur. À P1, les valeurs sont faibles pour les échantillons non traités (NT) et les échantillons traités par le fongicide (TF) ($\approx 0,01$), et atteignent un maximum pour le sol traité par l'herbicide (TH) ($\approx 0,05$). À P2, une légère hausse est observée chez les échantillons (NT) et les échantillons (TF) ($\approx 0,02$), tandis que les échantillons (TH) demeurent supérieurs ($\approx 0,04$). À P3, la situation se stabilise pour les échantillons (NT) et les échantillons (TF) ($\approx 0,02$), alors que le (TH) conserve la valeur la plus élevée ($\approx 0,05$).

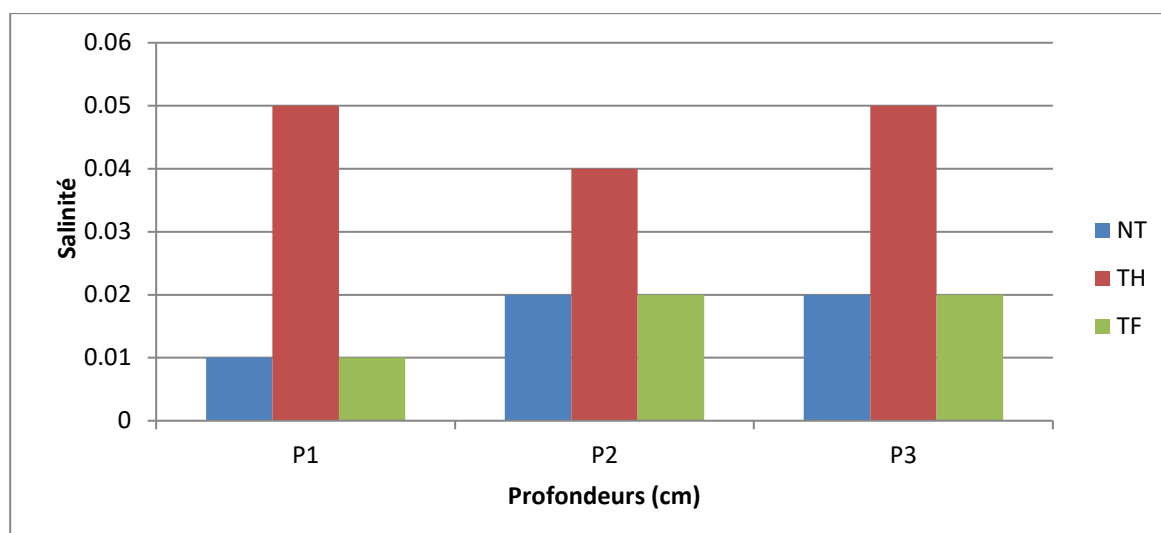


Figure 14: Variations de la salinité selon le traitement et la profondeur.

Les solides dissous totaux (TDS, mg/L). Les TDS montrent une variation nette en fonction de la profondeur et du type de traitement. À P1 (0–20 cm), les valeurs sont de 210 mg/L pour les sols non traités (NT), 290 mg/L pour les sols traités par l’herbicide (TH) et 400 mg/L pour les sols traités par le fongicide (TF). Cette première profondeur révèle donc un enrichissement marqué sous (TF), suivi de TH, tandis que le sol NT présente la valeur la plus faible. À P2 (20–40 cm), les teneurs atteignent 270 mg/L (NT), 260 mg/L (TH) et 190 mg/L (TF). On note ici un rapprochement des valeurs (NT) et (TH), avec une diminution significative pour (TF), indiquant une redistribution descendante différenciée selon le traitement. À P3 (40–60 cm), les concentrations sont de 155 mg/L (NT), 270 mg/L (TH) et 150 mg/L (TF). Ces résultats mettent en évidence un maintien des valeurs les plus élevées sous (TH) en profondeur, alors que (NT) et (TF) tendent à s’appauvrir fortement en TDS.

Le profil montre un maximum superficiel pour les échantillons traités par le fongicide (TF) à P1, puis une diminution marquée en profondeur. En revanche, pour les échantillons traités par l’herbicide (TH), les TDS demeurent élevés et relativement stables (260–290 mg/L), tandis que les échantillons non traités présentent une baisse progressive avec la profondeur.

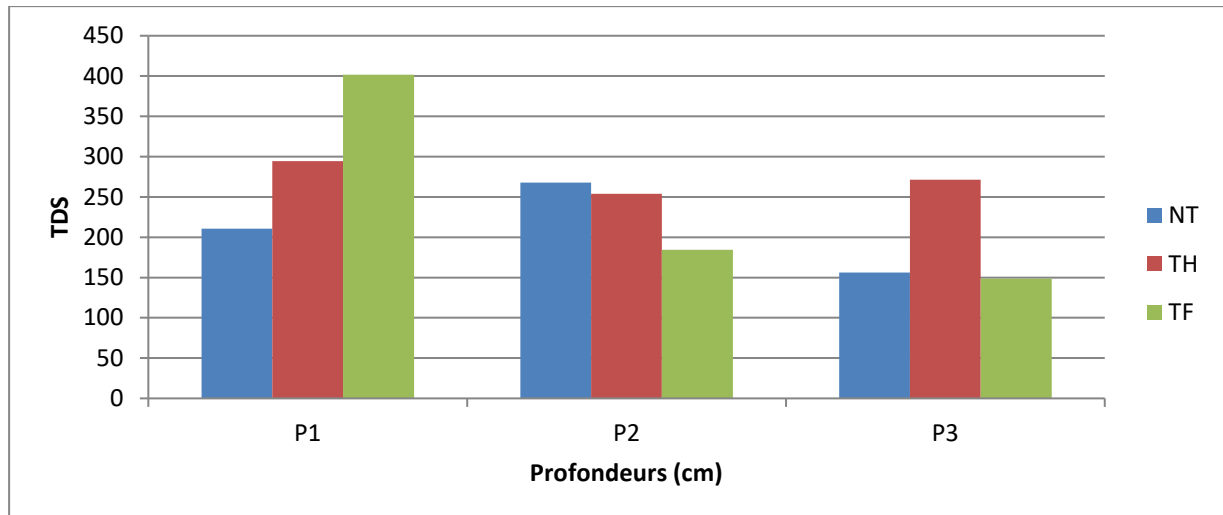


Figure 15: Variations de la TDS (taux des Seles minéraux) selon le traitement et la profondeur.

La conductivité électrique (CE, $\mu\text{S}/\text{cm}$) varie selon la profondeur et le traitement. À P1, les valeurs sont de 320 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour les échantillons (NT), 445 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour les échantillons traités par le Gallant Super et 235 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour les échantillons traités par le Consentio. À P2, les échantillons non traités (NT) demeurent proches (325 $\mu\text{S}/\text{cm}$), cependant les échantillons traités par l'herbicide (TH) atteignent 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et les échantillons traités par le fongicide (TF) 270 $\mu\text{S}/\text{cm}$. À P3, une diminution est observée pour toutes les modalités : 230 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour les échantillons (NT), 275 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour les échantillons (TH) et 215 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour les échantillons (TF). Les échantillons (TH) s'accompagnent des valeurs de CE les plus élevées, surtout en surface, tandis que les échantillons (TF) présentent des niveaux plus faibles et les échantillons (NT) affichent des valeurs intermédiaires. Le gradient décroissant avec la profondeur est conforme à une accumulation superficielle des sels solubles.

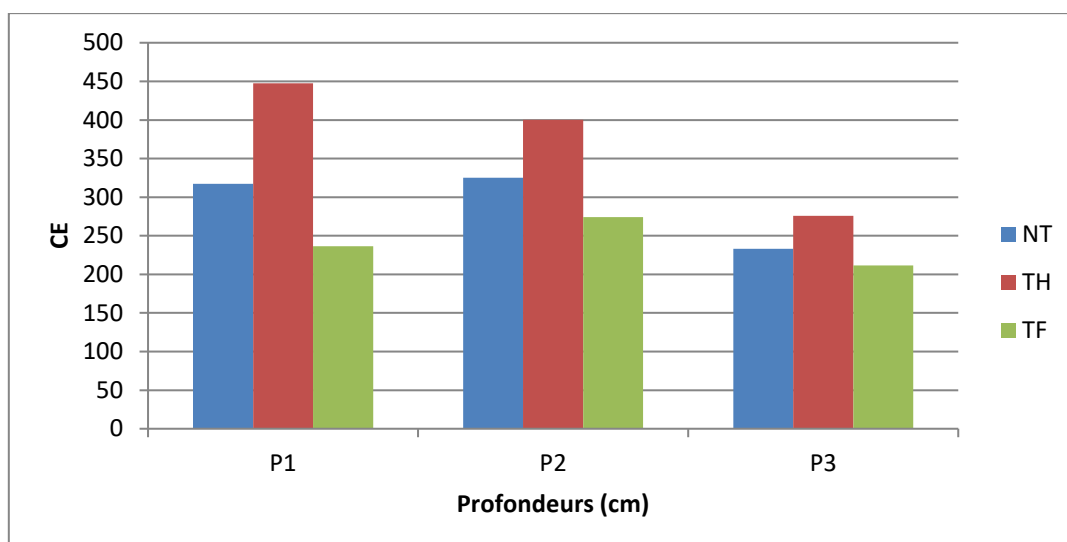


Figure 16: Variations de la CE ($\mu\text{S/cm}$) selon le traitement et la profondeur.

3.3 Matière organique (MO), carbone organique (CO) et rapport C/N

La matière organique (MO) varie conjointement avec la profondeur et le traitement. À toutes les profondeurs (P1, P2 et P3), les échantillons traités par l'herbicide (TH) présentent des teneurs nettement supérieures à celles des échantillons non traités (NT) et des échantillons traités par le fongicide (TF). Ces derniers montrent une diminution régulière entre P1 ($\approx 1,25\%$) et P2 ($\approx 1,10\%$), puis se maintiennent à un niveau faible à P3 ($\approx 1,15\%$). Les échantillons non traités (NT) affichent une légère hausse à P2 ($\approx 1,45\%$), suivie d'une baisse à P3 ($\approx 1,15\%$).

Le surplus de MO dans les échantillons traités par le Gallant Super est compatible avec un apport accru de résidus et, ou avec une minéralisation ralentie en surface, tandis que les profils des échantillons non traités (NT), et surtout ceux traités par le Consentio, suggèrent une MO plus limitée et une diminution avec la profondeur.

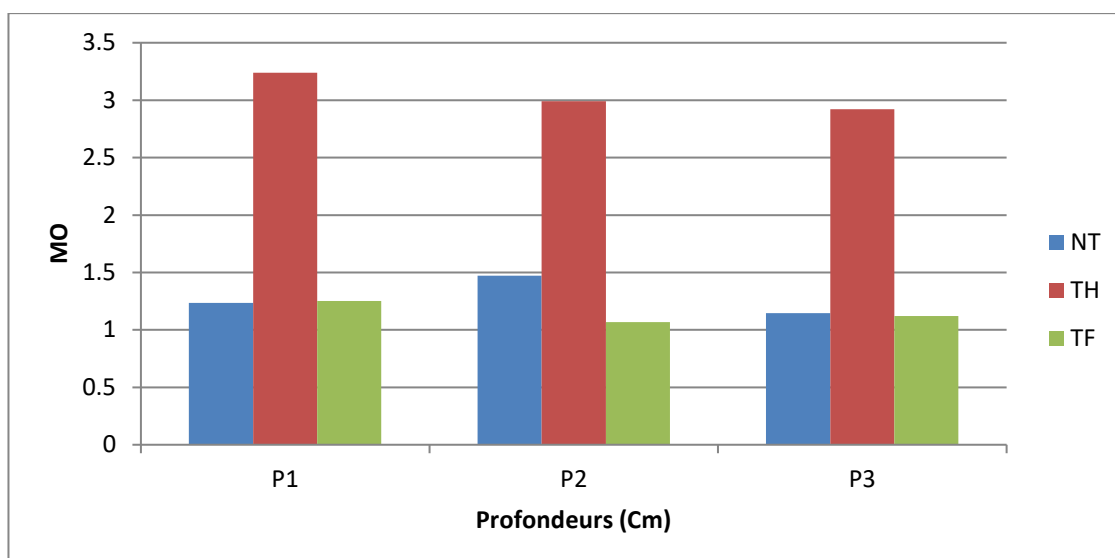


Figure 17: Variations de la matière organique MO (%) selon le traitement et la profondeur.

Le carbone organique (CO) varie selon la profondeur et le traitement. À chaque horizon (P1 [0–20 cm], P2 [20–40 cm] et P3 [40–60 cm]), le traitement par l’herbicide (TH) présente des valeurs supérieures, tandis que les échantillons non traités (NT) et les échantillons traités par le fongicide (TF) affichent des teneurs plus faibles et proches l’une de l’autre.

Ce profil traduit, pour les échantillons traités par l’herbicide (TH), un stockage accru de carbone organique (lié à un apport accru de résidus ou à une minéralisation ralentie), alors que les modalités correspondant aux échantillons non traités (NT) et aux échantillons traités par le fongicide (TF) restent modestes et peu différenciées entre elles.

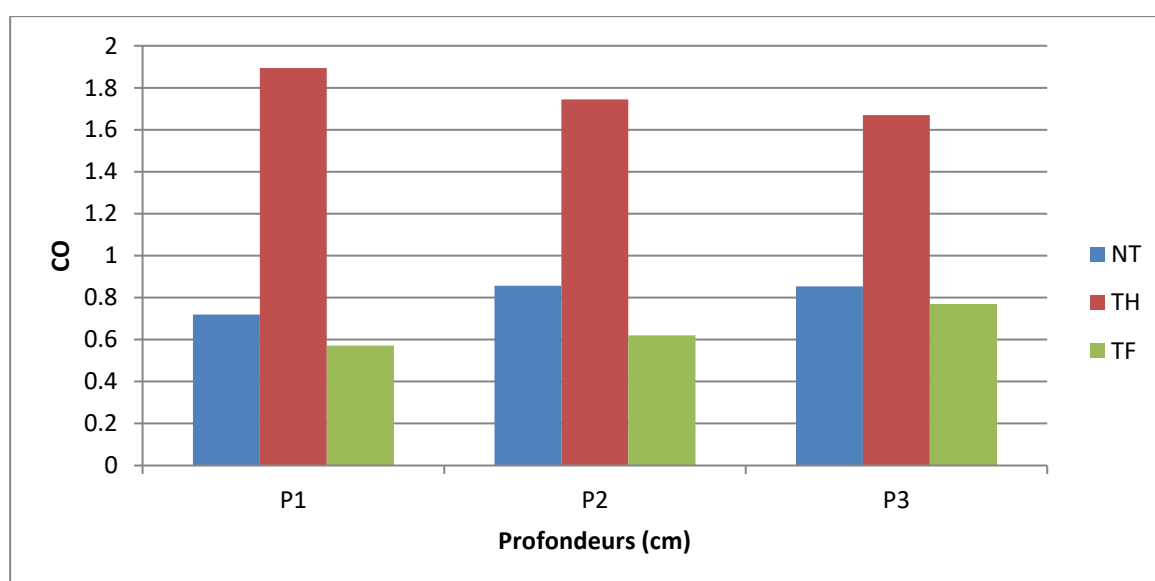


Figure 18: Variations du carbone CO (%) selon le traitement et la profondeur.

Le graphique illustre l'évolution du rapport C/N (carbone/azote) dans le sol en fonction de la profondeur (P1, P2 et P3) pour trois traitements. On observe que le rapport C/N est constamment plus élevé dans les échantillons non traités (NT), avec une valeur moyenne d'environ 2,4: il atteint $\approx 2,2$ à P1 et diminue jusqu'à $\approx 1,5$ à P3. En revanche, les échantillons traités par l'herbicide (TH) et ceux traités par le fongicide (TF) présentent des valeurs plus faibles et relativement proches, comprises entre $\approx 1,6$ et $\approx 1,3$. Cette tendance suggère que l'utilisation des pesticides, en particulier le fongicide (TF) entraîne une réduction du rapport C/N, traduisant une modification de la dynamique de la matière organique et un accroissement probable de la minéralisation azotée dans le sol.

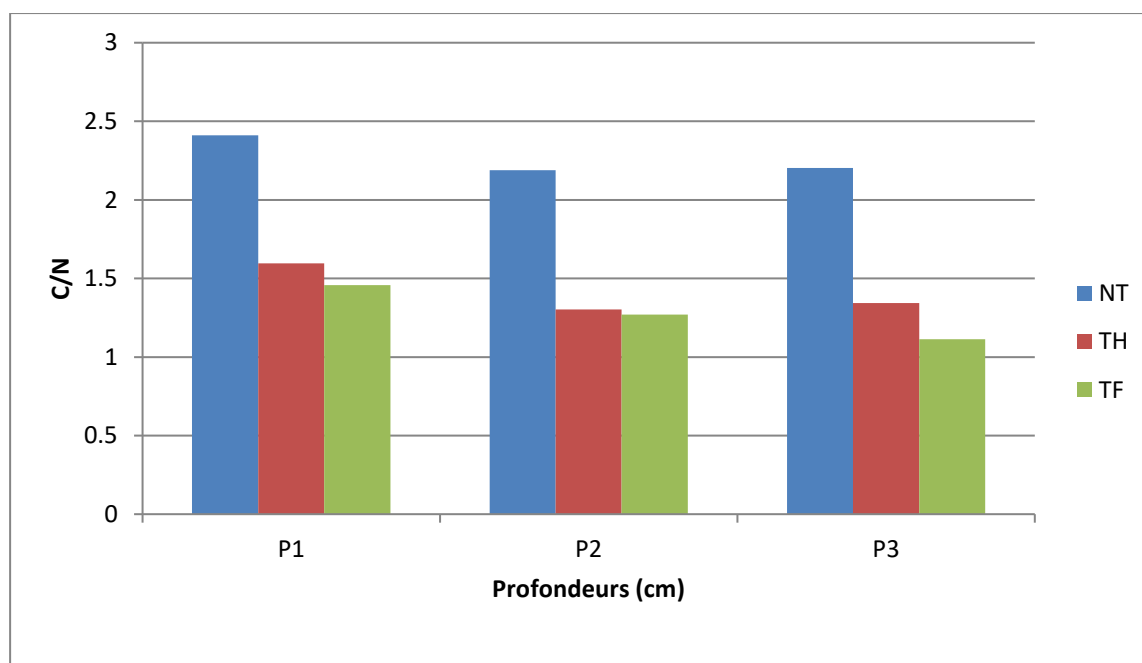


Figure 19: Variations du rapport (C/N) selon le traitement et la profondeur.

3.4 Éléments nutritifs majeurs (N, P, K) de sol.

3.4.1 Azote total (N).

La courbe illustre la teneur en azote (N %) dans le sol en fonction des profondeurs P1 (0–20 cm), P2 (20–40 cm) et P3 (40–60 cm), ainsi que du type de traitement. La concentration en azote est nettement supérieure dans la modalité des échantillons traités par l'herbicide (TH, Gallant Super) à toutes les profondeurs, particulièrement à P2 (20–40 cm) avec une valeur d' $\approx 1,42$ %, tandis que les échantillons non traités (NT) affichent des valeurs beaucoup plus faibles et stables ($\approx 0,38$ – $0,42$ %). Les échantillons traités par le fongicide (TF) montrent une augmentation progressive, passant de $\approx 0,39$ % à $\approx 0,83$ % entre P1 (0–20 cm) et P3 (40–60 cm). Ces résultats soulignent que l'application de l'herbicide stimule

considérablement la disponibilité de l'azote dans le sol, alors que le fongicide exerce un effet intermédiaire, et que les échantillons non traités (NT) présentent les teneurs les plus faibles en azote total.

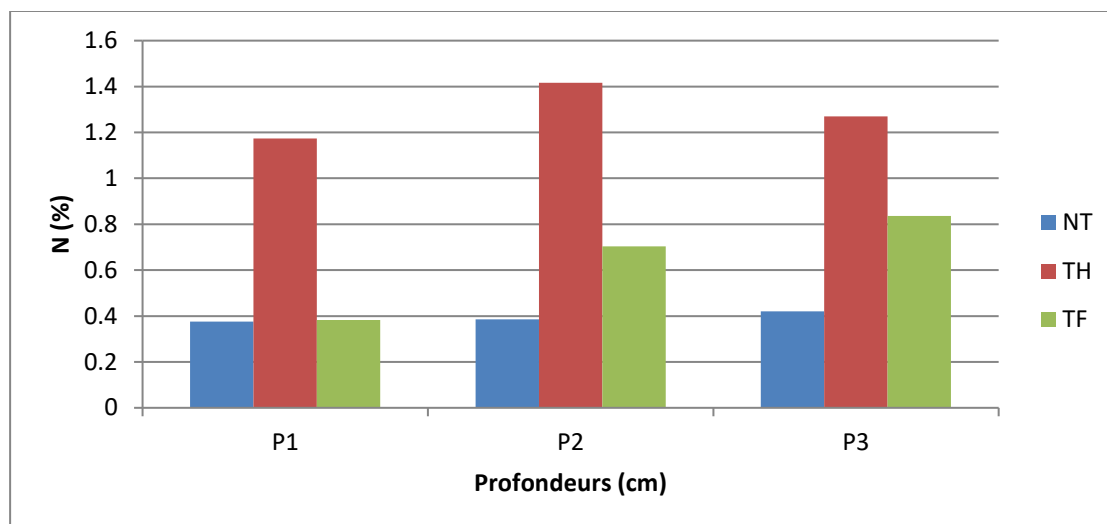


Figure 20: Variations de l'azote selon le traitement et la profondeur.

La courbe illustre la variation du phosphore (P %) selon la profondeur du sol [P1 (0–20 cm), P2 (20–40 cm) et P3 (40–60 cm)], ainsi que le type de traitement. La teneur en phosphore est la plus élevée dans les sols traités par l'herbicide (TH) à P1, avec $\approx 2,45$ %, puis elle diminue à P2 ($\approx 1,65$ %) avant de remonter à P3 ($\approx 1,8$ %), une valeur identique à celle des échantillons non traités (NT). Les échantillons (NT) conservent des valeurs intermédiaires, variant de $\approx 1,6$ % à $1,8$ % selon la profondeur. Quant aux échantillons (TF), ils présentent les plus faibles concentrations à toutes les profondeurs $\approx 0,45$ – $0,50$ % ce qui suggère un effet restrictif sur la disponibilité du phosphore dans le sol par rapport aux autres traitements.

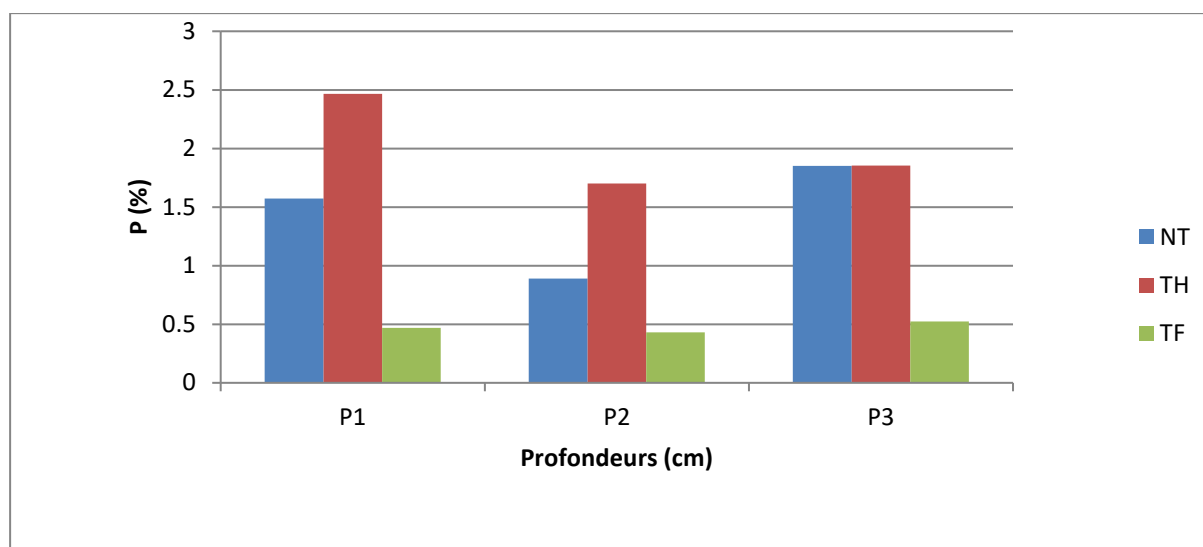


Figure 21: Variations du phosphore selon le traitement et la profondeur.

Le graphique illustre la teneur en potassium (K %) du sol en fonction de la profondeur (P1, P2, P3) pour trois modalités :

La concentration la plus élevée se retrouve dans les échantillons traités par l'herbicide (TH) à toutes les profondeurs, notamment à P1 (0–20 cm), avec $\approx 2,7$ %, suivie des échantillons non traités (NT), affichant $\approx 2,2$ % à P1, puis une baisse progressive en profondeur, tandis que les échantillons traités par le fongicide (TF) affichent les taux les plus faibles ($\approx 0,5$ % à P1 et $\approx 0,6$ % à P2). Ce profil montre que l'application de l'herbicide favorise une plus grande disponibilité du potassium dans le sol, alors que le fongicide en réduit significativement la teneur par rapport aux deux autres traitements.

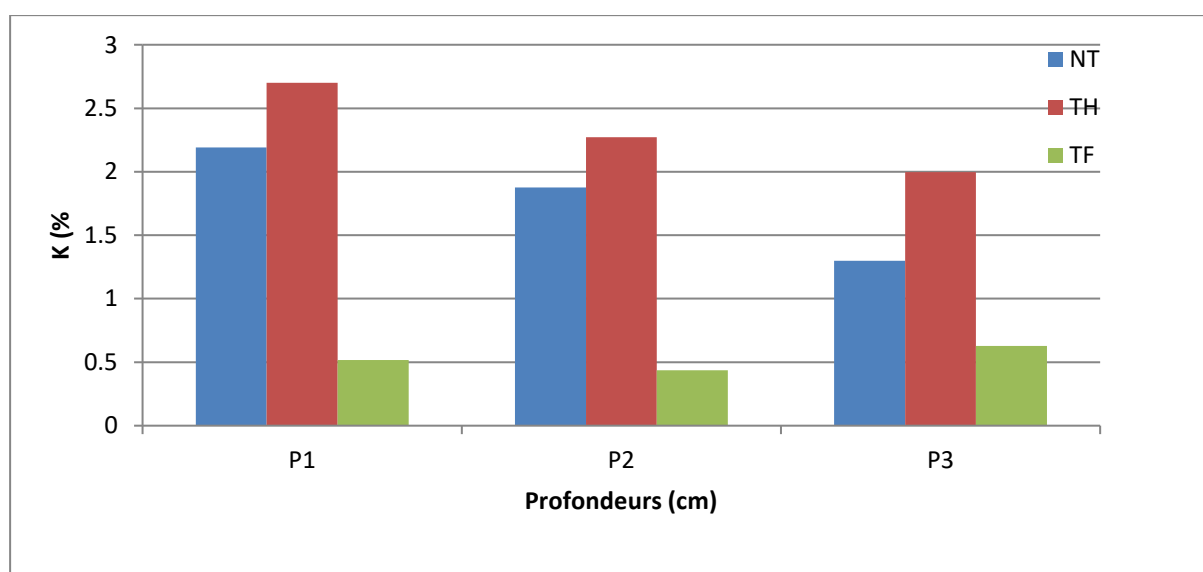


Figure 22: Variations du Potassium selon le traitement et la profondeur.

3.5. Les cations majeurs et calcaires (Ca^{2+} , Mg^{2+} , CaCO_3)

3.5.1 Variation des cations majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+})

Le graphique ci-dessous montre que la teneur en calcium (Ca^{2+}) du sol diminue progressivement avec la profondeur, atteignant sa valeur maximale dans les échantillons non traités (NT) à P1 (0–20 cm) avec environ 4,3 mg/L, tandis que les concentrations sont nettement réduites sous l'effet du fongicide à toutes les profondeurs, notamment à P3 (40–60 cm) avec environ 2,1 mg/L. Cela indique que l'application du fongicide réduit significativement la disponibilité du calcium par rapport aux échantillons non traités (NT) et à ceux traités par l'herbicide (TH), ce qui pourrait avoir un effet négatif sur la fertilité minérale du sol.

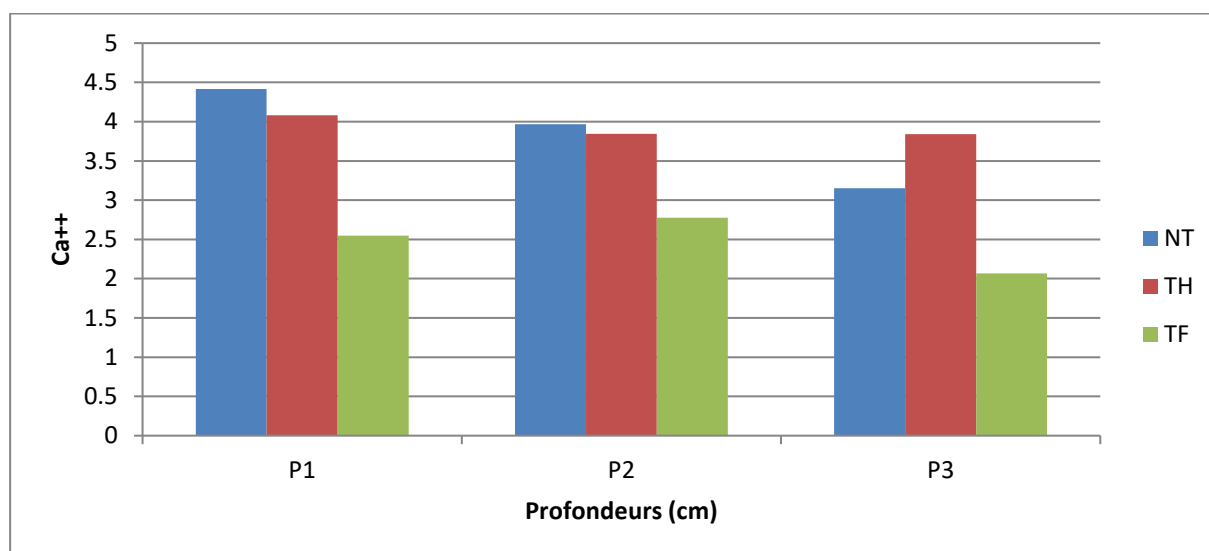


Figure 23: Variations du Calcium selon le traitement et la profondeur.

Le graphique illustre la variation du magnésium échangeable (Mg^{2+}) dans le sol selon la profondeur P1 (0–20 cm), P2 (20–40 cm) et P3 (40–60 cm) et selon le type de traitement. La teneur en magnésium est constamment la plus élevée dans les échantillons non traités (NT), atteignant environ 0,25 mg/L aux profondeurs P1 et P3, tandis que les valeurs des échantillons traités par l'herbicide (TH) demeurent les plus faibles à toutes les profondeurs, oscillant entre 0,13 et 0,17 mg/L.

Pour les échantillons traités par le fongicide (TF), les teneurs sont intermédiaires, légèrement supérieures à celles observées dans les échantillons traités par l'herbicide (TH) et relativement stables, comprises entre 0,18 et 0,21 mg/L.

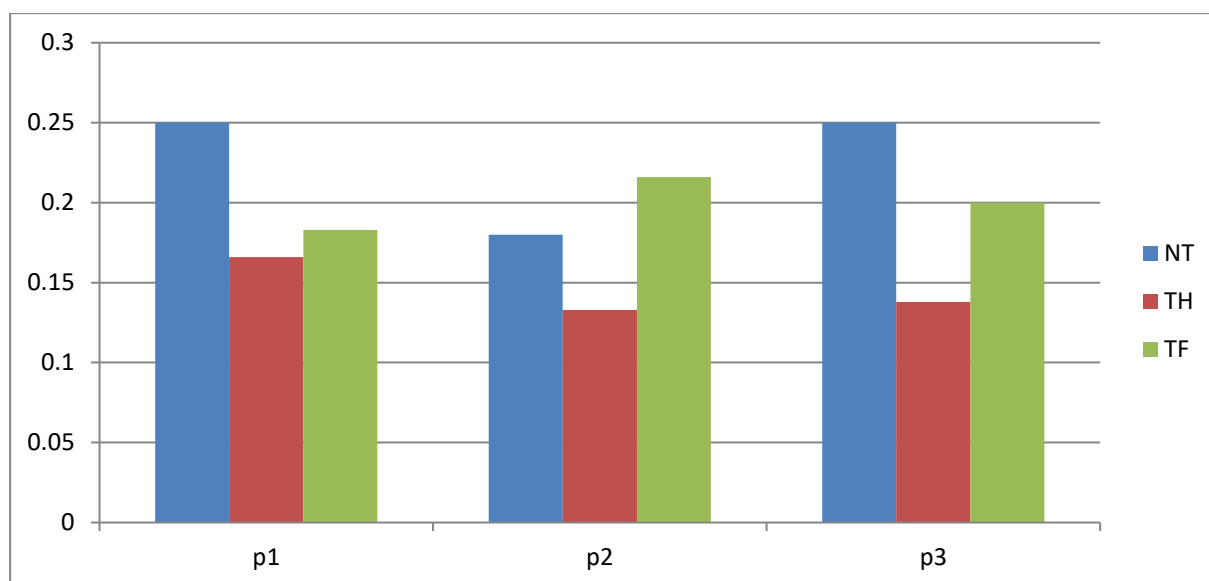


Figure 24: Variations du Magnésium selon le traitement et la profondeur.

La teneur en calcaire varie en fonction de la profondeur et du type de traitement. Les échantillons non traités (NT) montrent une diminution modérée, passant de P1 (0–20 cm) avec une valeur d'environ 4,8 % à P2 (20–40 cm) où la teneur atteint $\approx 3,9$ %. Les échantillons traités par l'herbicide (TH) présentent les valeurs les plus élevées à toutes les profondeurs, avec un maximum à P1 (0–20 cm) ($\approx 6,9$ %), suivi d'une baisse progressive jusqu'à $\approx 4,1$ % à P3 (40–60 cm).

Enfin, les échantillons traités par le fongicide (TF) affichent des teneurs nettement plus faibles, avec un pic à P2 (20–40 cm) ($\approx 3,0$ %) et un minimum à P3 (40–60 cm) ($\approx 1,7$ %).

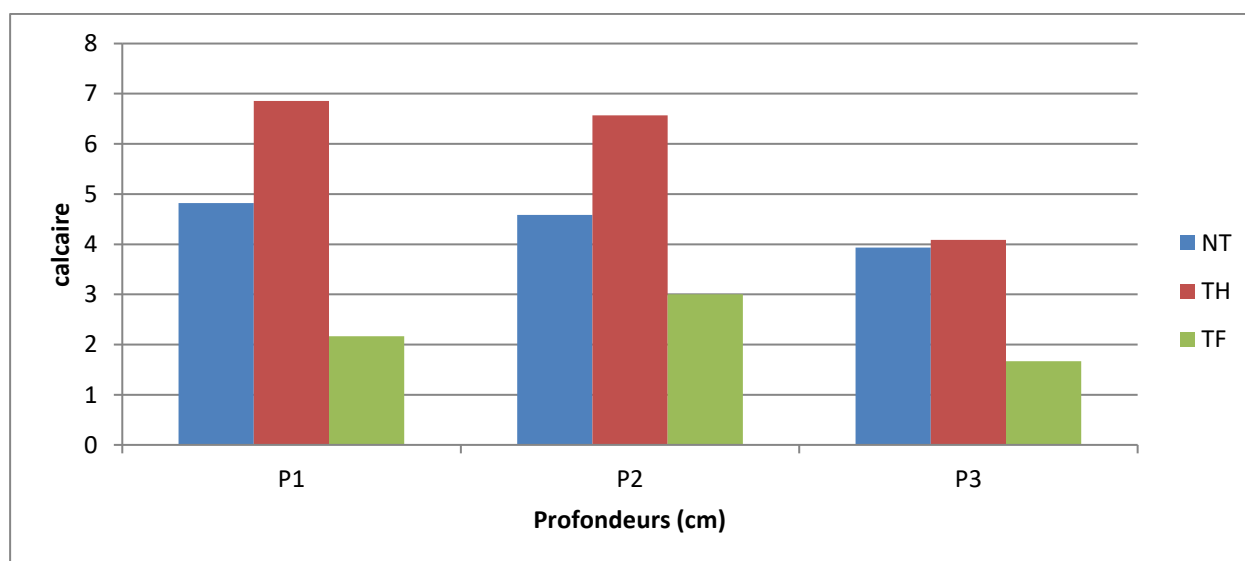


Figure 25: Variations du Calcaire total selon le traitement et la profondeur.

4 .Analyse statistique

Une Analyse en Composantes Principales (ACP) est appliquée entre les paramètres physico-chimiques : pH, salinité, TDS, CE, MO, CO, Cal, Ca^{+2} , Mg^{+2} , N, P, K et C/N afin de ressortir toutes les relations possibles entre des variables.

Une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) est appliquée pour objectif d'identifier le nombre et la composition de chaque groupe homogène de types de sols.

La normalité est vérifiée par le test de Shapiro-Wilk à travers tous les paramètres physico-chimiques testés afin de choisir le bon test.

Application du test ANOVA à deux facteurs au seuil de $P \leq 0,05$ afin d'étudier l'effet de deux facteurs : type du sol (sol témoin, sol traité par herbicide et sol traité par fongicide), profondeur (0-20cm, 20-40cm et 40-60cm) ainsi que l'interaction type du sol $\times$ profondeur sur les 13 paramètres physico-chimiques proposés. Lors de la détermination des différences significatives, le test post hoc Dunnett est appliqué pour comparer les deux modalités du sol (sol traité par herbicide et sol traité par fongicide) avec la modalité témoin non traité après la vérification de l'homogénéité des variances par le test de Levene.

4.1. Les corrélations linéaires entre les paramètres physico-chimiques

L'identification des corrélations linéaires consiste à analyser les relations existantes entre les différents paramètres physico-chimiques d'un sol (comme le pH, la salinité, la conductivité électrique, la matière organique, etc.) afin de comprendre comment ils varient les uns par rapport aux autres.

Cette analyse repose généralement sur le calcul du coefficient de corrélation de Pearson (r), qui mesure la force et la direction de la relation linéaire entre deux variables.

- Déterminer si certains paramètres évolue ensemble (corrélation positive) ou en sens inverse (corrélation négative).
- Identifier les interactions les plus significatives entre les propriétés du sol.
- Comprendre les mécanismes physico-chimiques influençant la qualité du sol

Tableau 17: Matrice des corrélations des paramètres physico-chimiques des sols (n= 3).

Paramètres	pH	Salinité	TDS (mg/l)	CE ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	MO (%)	CO	Cal (%)	Ca+ (mg/l)	Mg+3 (mg/l)	N (%)	P (%)	K (%)	C/N
pH	1												
Salinité	0,302	1											
TDS	-0,153	0,744	1										
CE	-0,365	0,560	0,933	1									
MO	0,148	0,943	0,870	0,747	1								
CO	0,121	0,952	0,840	0,714	0,993	1							
Cal.	-0,299	0,763	0,903	0,857	0,883	0,890	1						
Ca+ ²	-0,627	0,366	0,770	0,760	0,546	0,540	0,830	1					
Mg+ ²	-0,333	-0,614	-0,716	-0,635	-0,723	-0,676	-0,505	-0,234	1				
N	0,543	0,899	0,625	0,455	0,873	0,856	0,615	0,150	-0,688	1			
P	-0,158	0,765	0,822	0,756	0,887	0,877	0,910	0,767	-0,454	0,634	1		
K	-0,409	0,608	0,850	0,838	0,777	0,779	0,946	0,892	-0,370	0,448	0,913	1	
C/N	-0,896	-0,412	-0,019	0,116	-0,295	-0,249	0,123	0,524	0,462	-0,685	0,014	0,302	1

L'analyse des corrélations entre les paramètres physico-chimiques du sol permet de comprendre les interactions complexes entre les différentes propriétés du sol et leur influence sur la fertilité et la qualité édaphique.

La matrice de corrélations présentée dans le Tableau 17 montre la relation entre des paramètres tels que le pH, la salinité, la conductivité électrique (CE), les matières organiques (MO et CO), les principaux éléments minéraux (Ca^{2+} , Mg^{2+} , N, P, K) et le rapport C/N.

- Les corrélations positives élevées (proches de +1) indiquent que certains paramètres évoluent dans le même sens, par exemple la salinité et la matière organique, ou le calcium disponible et le potassium.
- Les corrélations négatives (proches de -1) révèlent des relations inverses, comme le pH et le rapport C/N, ou le magnésium et l'azote.

4.2. Analyse en Composantes Principales (ACP) des paramètres physico-chimiques des sols, projection de tous les paramètres sur les deux axes 1 et 2.

Le graphique représente le plan factoriel issu d'une Analyse en Composantes Principales (ACP) des paramètres physico-chimiques du sol.

- **Axes:**
 - L'axe horizontal (Facteur 1) explique 64,49% de la variance totale des données.
 - L'axe vertical (Facteur 2) explique 25,81% de la variance.
- Ensemble, les deux axes expliquent 90,30% de la variance, ce qui indique que ce plan factoriel résume de manière très représentative la majorité des informations contenues dans les données .

Chaque paramètre (pH, MO, CO, Ca^{2+} , Mg^{2+} , N, P, K, TDS, CE, salinité, Cal, C/N) est représenté par un vecteur.

- La longueur du vecteur indique la contribution du paramètre au plan factoriel (plus le vecteur est long, plus le paramètre influence fortement l'ACP).
- La direction des vecteurs montre la corrélation entre les paramètres :
 - Vecteurs proches les uns des autres : corrélation positive forte.
 - Vecteur opposés: corrélation négative.
 - Vecteurs perpendiculaires : pas de corrélation
- Ce graphique permet de visualiser les relations entre tous les paramètres du sol en un seul plan, facilitant ainsi l'identification des groupes de variables corrélées et leur impact sur la fertilité et la qualité édaphique. Il constitue un outil essentiel pour interpréter les effets des traitements agricoles et guider les recommandations agronomiques

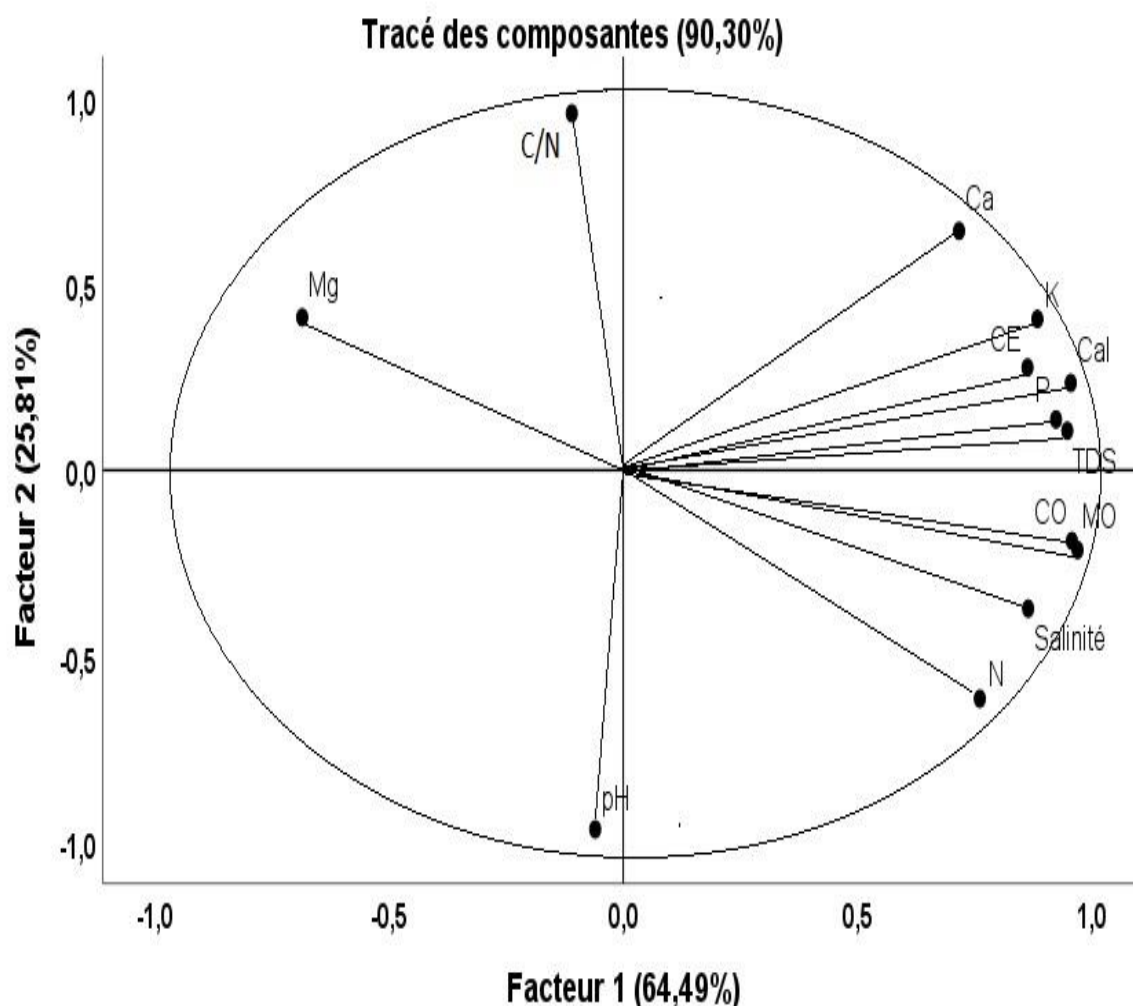


Figure 26: Analyse en Composantes Principales (ACP) des paramètres physico-chimiques des sols, projection de tous les paramètres sur les deux axes 1 et 2

Le cercle de corrélation met en évidence plusieurs corrélations positives et bilatérales entre les paramètres physico-chimiques étudiés. Les relations les plus marquantes concernent notamment les blocs formés par N, P et K avec la salinité, les TDS, la CE, la MO, le CO et le calcaire ; ainsi que celles entre la MO, le CO et le calcaire avec la salinité, les TDS et la CE. De même, le Ca^{+2} présente des corrélations positives avec les TDS, la CE, la MO, le CO et le calcaire, tandis que la CE est positivement liée à la salinité et aux TDS. Des corrélations sont également observées entre le Ca^{+2} et les éléments P, K et le rapport C/N. En revanche, les résultats de l'ACP révèlent aussi l'existence de corrélations négatives, notamment entre la teneur en Mg^{+2} et les paramètres salinité, TDS, CE, MO, CO et calcaire, ainsi qu'entre le pH et Ca^{+2} ou C/N, entre N et Mg^{+2} , et enfin entre C/N et N. L'analyse en composantes

principales montre que les variables sont réparties distinctement sur deux axes principaux : le Facteur 1, expliquant 64,49 % de la variance totale, et le Facteur 2, représentant 25,81 %, soit ensemble 90,30 % de la variance globale. Les variables telles que Ca^{+2} , K, CE, Cal, TDS, CO, MO et Salinité se situent dans la partie positive du Facteur 1 avec des directions similaires, tandis que Mg^{+2} , C/N et pH se positionnent différemment, soit sur le Facteur 2, soit sur la partie négative du Facteur 1, traduisant ainsi leur contribution distincte à la variance totale des données. Globalement, la majorité des variables sont fortement associées au Facteur 1, alors que certaines se distinguent par leur orientation vers le Facteur 2 ou la partie négative du premier axe.

4.3. Classification des types de sols par analyse ascendante hiérarchique (CAH)

Un dendrogramme est une représentation graphique de la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH), une méthode permettant de regrouper des données ou des échantillons en fonction de leur similitude. Ce diagramme arborescent montre visuellement comment différents types de sols se rassemblent pour former des groupes homogènes, selon leurs caractéristiques physico-chimiques.

Le dendrogramme, associé à la CAH, facilite :

- La détection de groupes naturels dans les données, sans avoir à choisir leur nombre au préalable.
- L'interprétation des relations entre les types de sols, en visualisant quelles unités sont les plus similaires et lesquelles se différencient fortement.
- La synthèse des résultats de classification, permettant d'identifier clairement trois groupes homogènes de sols
 - Un groupe avec faibles taux en MO, CO, calcaire, Ca^{+2} , N, P, K et taux élevés en Mg^{+2} .
 - Un groupe à taux moyens pour ces paramètres et Mg^{2+} élevé.
 - Un groupe avec taux élevés en MO, CO, calcaire, Ca^{+2} , N, P, K et faibles en Mg^{2+} .

Cette classification rend les résultats beaucoup plus lisibles et exploitables pour la gestion des sols et l'interprétation des processus environnementaux. Le dendrogramme est donc essentiel pour hiérarchiser, regrouper et clarifier la typologie des sols étudiés dans notre recherche.

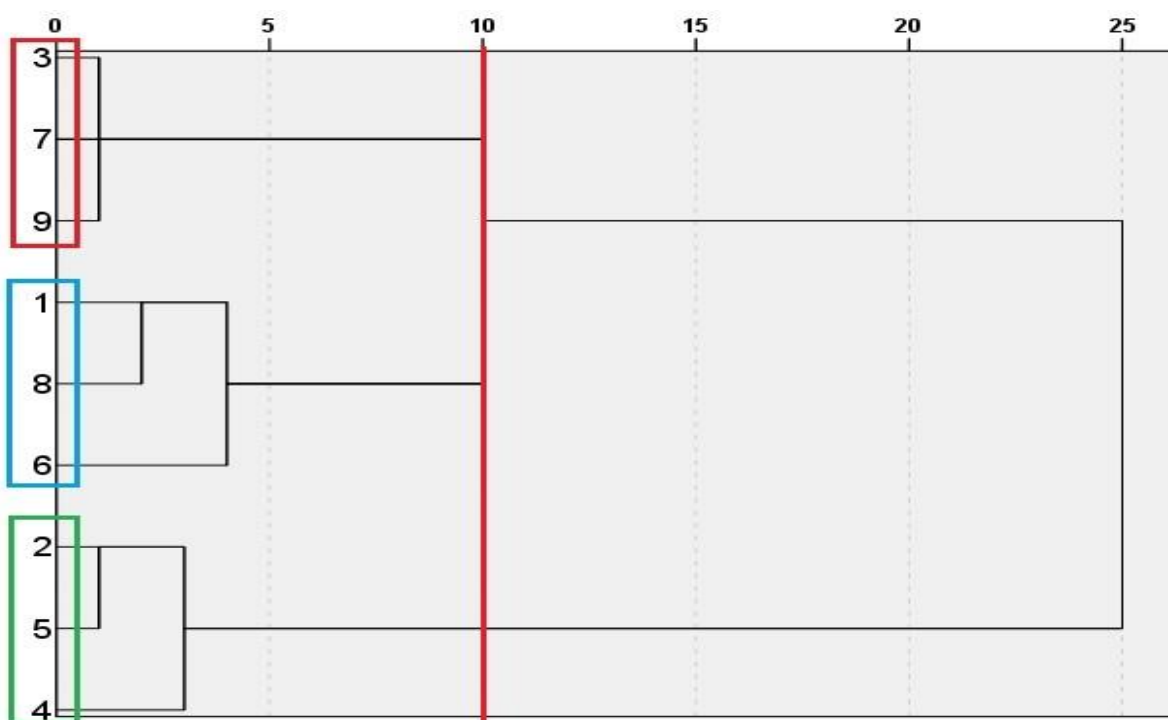


Figure 27: Dendrogramme de la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) entre les groupes selon les types de sol

Légende : 1 : NT 0-20cm, 2 : NT 20-40cm, 3 : NT 40-60cm, 4 : TH 0-20cm, 5 : TH 20-40cm, 6 : TH 40-60cm, 7 : TF 0-20cm, 8 : TF 20-40cm, 9 : TF 40-60cm.

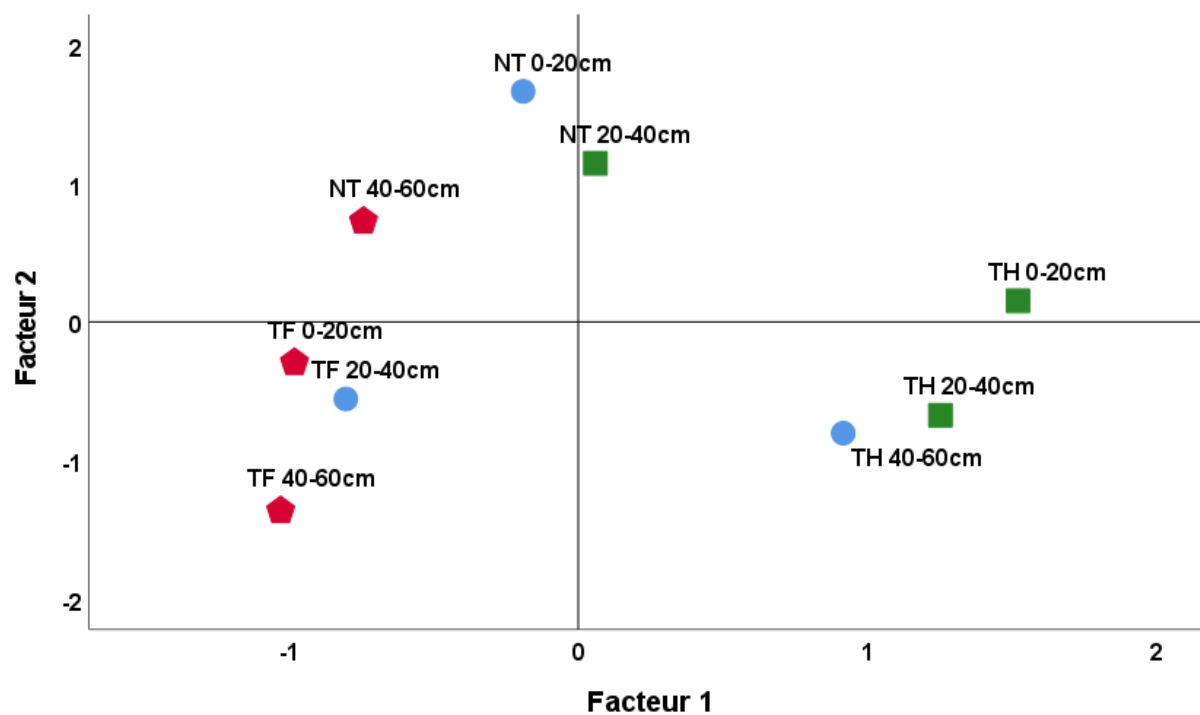


Figure 28: Projection de types de sols sur les deux facteurs 1 et 2.

La projection des neuf types de sols montre une répartition claire selon le type de sol et la profondeur. Le Facteur 1 (axe horizontal) et le Facteur 2 (axe vertical) expliquent ensemble la majorité de la variance totale des données.

On observe que les échantillons de sol NT, situés à droite du graphique, se regroupent dans la partie positive du Facteur 1, indiquant des caractéristiques physico-chimiques distinctes, notamment des valeurs plus élevées de conductivité électrique, de salinité et d'éléments nutritifs La matière organique.

Les échantillons du sol TH se localisent dans la partie supérieure du graphique, principalement sur la zone positive du Facteur 2, traduisant une richesse relative en matière organique, en carbone organique et en calcaire.

En revanche, les échantillons du sol TF se placent dans la partie négative des deux axes, suggérant des teneurs plus faibles en matière organique, en carbone organique et en éléments minéraux.

Ainsi, la distribution spatiale des points révèle une séparation nette entre les trois types de sols (NT, TH et TF) et met en évidence l'influence conjointe du type de sol et de la profondeur sur les propriétés physico-chimiques mesurées

4.4. Effets du type de sol et de la profondeur sur les propriétés physico-chimiques

Le test ANOVA à deux facteurs a montré que le facteur type de sol possède un effet significatif au moins au niveau de $P < 0,05$ sur tous les paramètres sauf salinité, TDS, CE et rapport C/N. Le même test a signalé l'absence d'une différence significative ($P > 0,05$) pour le facteur profondeur sur tous les paramètres testés sauf le pH ($P = 0,036$). Par contre, l'interaction type du sol $\times$ profondeur n'a révélée aucune différence significative ($p > 0,05$) sur tous les paramètres testés.

Tableau 18: ANOVA à deux facteurs, P_{values} des effets sol, profondeur et sol $\times$ profondeur sur les paramètres physico-chimiques.

Source de variation	d.d.l.	pH	Salinité	TDS (mg/l)	CE ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	MO (%)	CO (%)	Cal. (%)
Sol	2	0,000***	0,235 ^{ns}	0,126 ^{ns}	0,246 ^{ns}	0,000***	0,000***	0,000***
Profondeur	2	0,036*	0,877 ^{ns}	0,623 ^{ns}	0,433 ^{ns}	0,879 ^{ns}	0,998 ^{ns}	0,281 ^{ns}
Sol $\times$ profondeur	4	0,621 ^{ns}	0,985 ^{ns}	0,962 ^{ns}	0,937 ^{ns}	0,925	0,934 ^{ns}	0,922 ^{ns}
Source de variation	d.d.l.	Ca ⁺ (mg/l)	Mg ⁺⁺ (mg/l)	N (%)	P (%)	K (%)	C / N	
Sol	2	0,000***	0,037*	0,000***	0,000***	0,000***	0,213 ^{ns}	
Profondeur	2	0,069 ^{ns}	0,291 ^{ns}	0,265 ^{ns}	0,133 ^{ns}	0,475 ^{ns}	0,858 ^{ns}	
Sol $\times$ profondeur	4	0,726 ^{ns}	0,549 ^{ns}	0,646 ^{ns}	0,804 ^{ns}	0,857 ^{ns}	0,997 ^{ns}	

ns : non significative ($P > 0,05$), ** $P < 0,01$. *** $P < 0,001$ d.d.l. : degrés de libertés.

L'analyse de la variance à deux facteurs (ANOVA) a permis d'évaluer l'effet d'un type d'échantillon (NT.TH.TF), de la profondeur et de leur interaction sur les différents paramètres physico-chimiques étudiés.

Les résultats montrent que la nature d'échantillon exerce une influence hautement significative ($P < 0,001$) sur plusieurs paramètres, notamment le pH, la matière organique (MO), le carbone organique (CO), le calcaire (Cal), ainsi que sur les éléments Ca^{+2} , N, P et K. Cela indique que les différences entre les types de sols ont un effet marqué sur la composition physico-chimique globale.

En revanche, la profondeur n'a montré qu'un effet significatif sur le pH ($P = 0,036$), tandis qu'elle reste non significative (ns) pour l'ensemble des autres paramètres, suggérant une relative homogénéité verticale des sols dans la zone étudiée.

La nature d'échantillon $\times$ profondeur ne présente aucun effet significatif ($P > 0,05$) sur tous les paramètres, ce qui signifie que l'effet du sol est indépendant de la profondeur : autrement dit, les variations observées entre types de sols ne changent pas selon la profondeur d'échantillonnage.

En résumé, ces résultats démontrent que la nature d'échantillon est le facteur déterminant principal dans la variation des propriétés physico-chimiques.

5. Comparaison des sols témoins et des sols traités par herbicide et fongicide

Le test Dunnett a montré une différence significative ($P < 0,05$) entre le témoin et les sols traités par herbicide uniquement pour les paramètres pH, MO, CO, calcaire, Mg^{+2} , N et P. Le même test a rapporté l'existence d'une différence significative entre les sols témoins et

les sols traités par fongicide uniquement pour les paramètres pH, calcaire, Ca^{+2} et K. Les sols traités par herbicide ou fongicide sont fortement alcalins (avec les moyennes de 8,86 et 8,98 respectivement) et diffèrent significativement avec le témoin modérément alcalin (avec une moyenne de 8,40) (figure 33). Les sols traités par herbicides caractérisés par des valeurs élevées en MO (figure 34), CO (figure 35), calcaire (figure 36), Mg^{+2} (figure 38), N (figure 39) et P (figure 40). Les sols traités par fongicides caractérisés par des teneurs élevées en calcaires, Ca^{+2} et K.

5.1. Comparaison des valeurs moyennes de pH entre les trois types de sols

La comparaison des valeurs moyennes de pH entre trois types d'échantillon : NT (sol non traité), TH (sol traité par herbicide) et TF (sol traité par fongicide).

Cette comparaison est essentielle, car le pH du sol influence directement la disponibilité des éléments nutritifs et l'activité des micro-organismes du sol, et il oriente aussi la dégradation des résidus de pesticides et l'efficacité des traitements appliqués. Les résultats de ce graphique permettent donc d'évaluer l'effet des produits phytosanitaires sur les caractéristiques acido-basiques du sol, un paramètre clé pour la gestion de la fertilité et la préservation de la santé des sols agricoles.

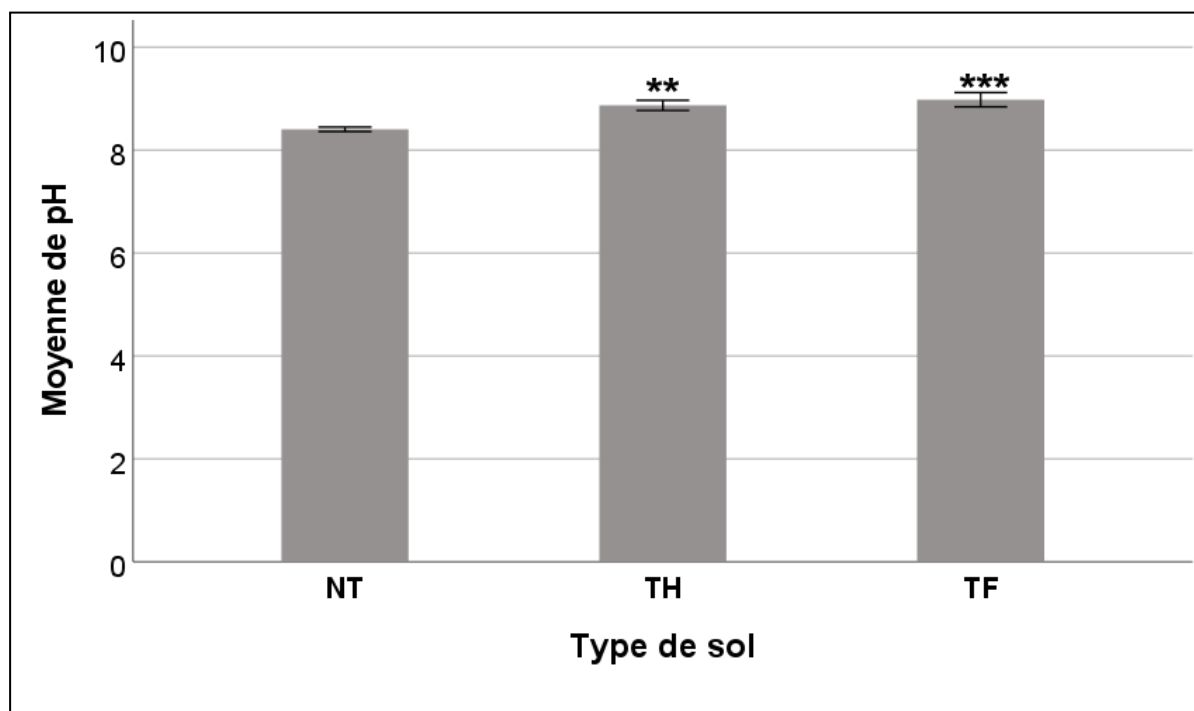


Figure 29: Valeurs moyennes de pH dans trois types de sol.

Légende : NT : sol non traité. TH : sol traité par herbicide. TF : sol traité par fongicide.

Les valeurs les plus élevées du pH moyen sont observées dans les sols de type TH et TF, tandis que la valeur est plus faible dans les sols NT. On remarque également que l'erreur standard (SE) est relativement faible, ce qui témoigne d'une homogénéité des mesures à l'intérieur de chaque groupe.

Dans l'ensemble, les résultats soulignent que les propriétés acido-basiques varient clairement selon le type de sol étudié, TH et TF présentant des valeurs de pH plus élevées que NT. Ces différences reflètent l'effet du type de sol sur le niveau de pH observé.

5.2. Comparaison des valeurs de MO entre les trois types de sols

Les résultats présentent la comparaison du taux de matière organique (MO) entre trois types de sols : NT (non traité), TH (traité par herbicide) et TF (traité par fongicide). Le sol (TH) présente un taux de MO nettement plus élevé, avec une différence hautement significative, tandis que le sol traité par fongicide (TF) n'affiche pas de différence significative par rapport au témoin (NT).

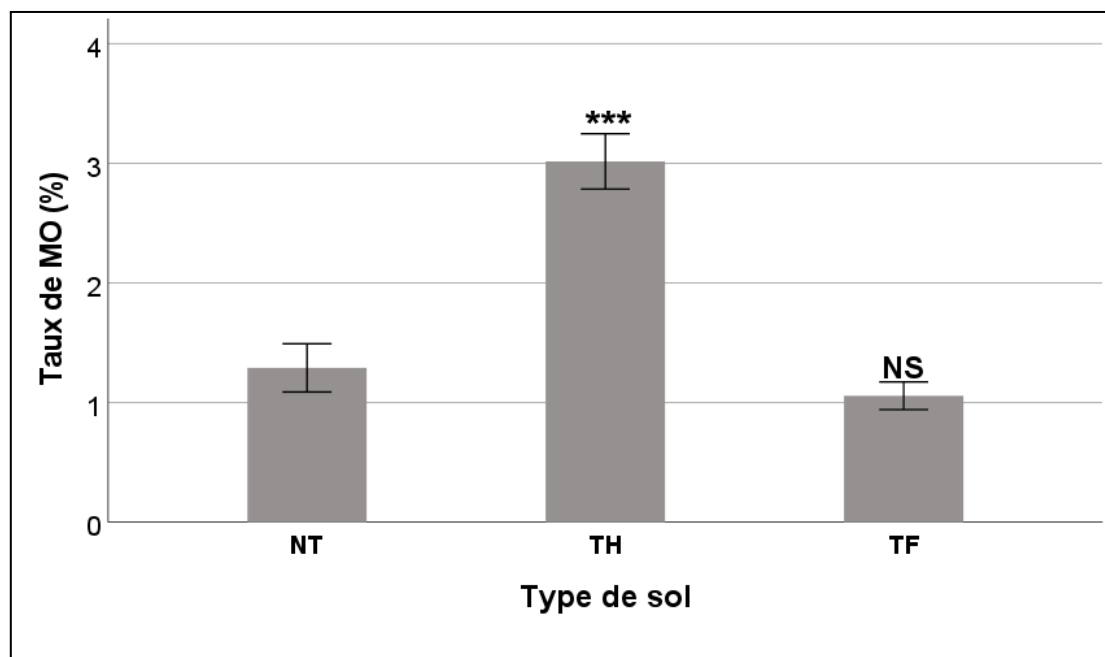


Figure 30: Taux de Matière organiques dans les trois types du sol.

Légende : NT : sol non traité. TH : sol traité par herbicide. TF : sol traité par fongicide.

Selon les données du graphique, le taux de MO (%) est d'environ 1,4% dans le sol non traité (NT), il atteint 3,0% dans le sol traité par herbicide (TH), alors qu'il est d'environ 1,2% dans le sol traité par fongicide (TF). La différence entre les sols (NT) et (TH) est hautement significative, tandis que la différence entre les sols (NT) et (TF) n'est pas significative (NS).

Ces résultats montrent clairement que l'application de l'herbicide augmente de façon marquée le taux de matière organique du sol, tandis que le traitement par fongicide n'a pas d'effet significatif comparé au sol témoin.

5.3. Comparaison des valeurs moyennes de CO entre les types de sols

Les résultats mettent en évidence la comparaison du taux de carbone organique (CO) dans trois types de sols : (NT), (TH) et (TF).

Ce graphique permet donc d'illustrer et de quantifier l'impact des traitements herbicide et fongicide sur le stock de carbone organique dans le sol. Il met en valeur l'influence positive des herbicides sur le taux de carbone organique, contrairement au fongicide qui ne montre pas d'effet notable ici. Cette information est précieuse pour comprendre la dynamique de la matière organique et orienter la gestion agronomique des sols.

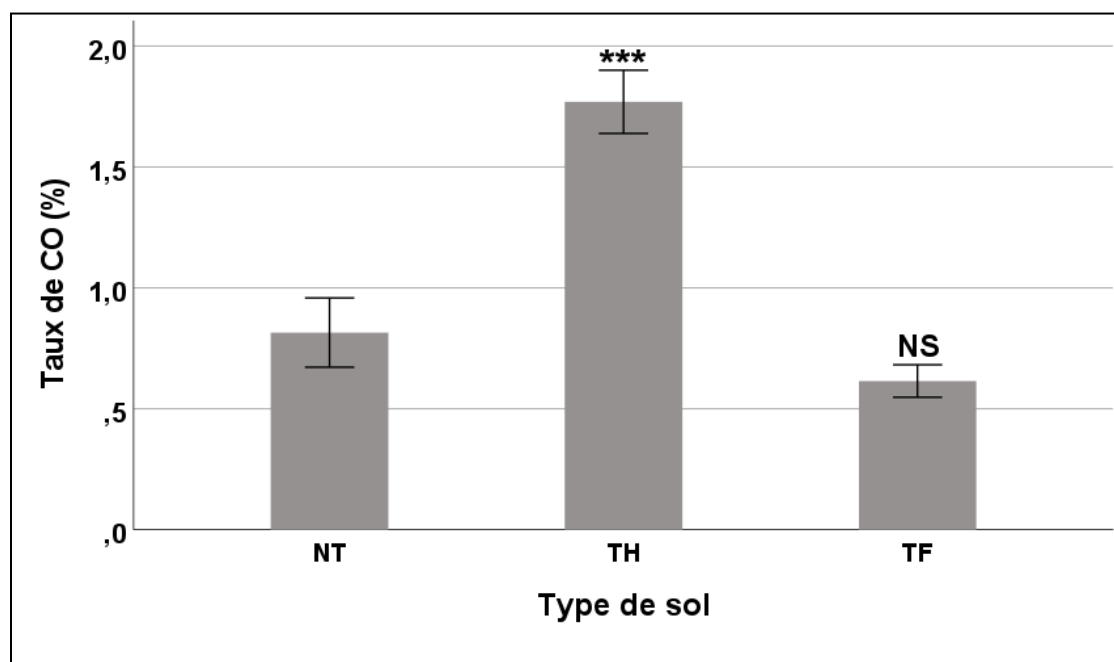


Figure 31: Taux de carbone organiques dans les trois types du sol.

Légende : NT : sol non traité. TH : sol traité par herbicide. TF : sol traité par fongicide.

Le sol soumis au traitement herbicide (TH) présente un taux de CO nettement supérieur, avec une différence hautement significative par rapport au sol témoin (NT). À l'inverse, le traitement fongicide (TF) n'entraîne pas de variation significative du CO par rapport au témoin. Le sol non traité (NT) présente un taux de carbone organique d'environ 0,9 %.

- Le sol traité par herbicide (TH) affiche une valeur nettement supérieure d'environ 1,8 %, soit le double du témoin, avec une différence statistiquement très significative.

- Le sol traité par fongicide (TF) montre une teneur en CO proche de 0,7 %, sans différence significative par rapport au sol non traité (NS).

5.4. Comparaison des valeurs moyennes de Calcaire entre les trois types de sols

La comparaison des taux moyens de calcaire entre trois types de sols (NT), (TH) et les soles (TF) revêtent une importance particulière. Les résultats présentés dans le graphique permettent donc d'apprécier clairement l'impact des herbicides et fongicides sur le calcaire, un facteur essentiel pour la gestion agronomique et la préservation de la qualité des sols agricoles.

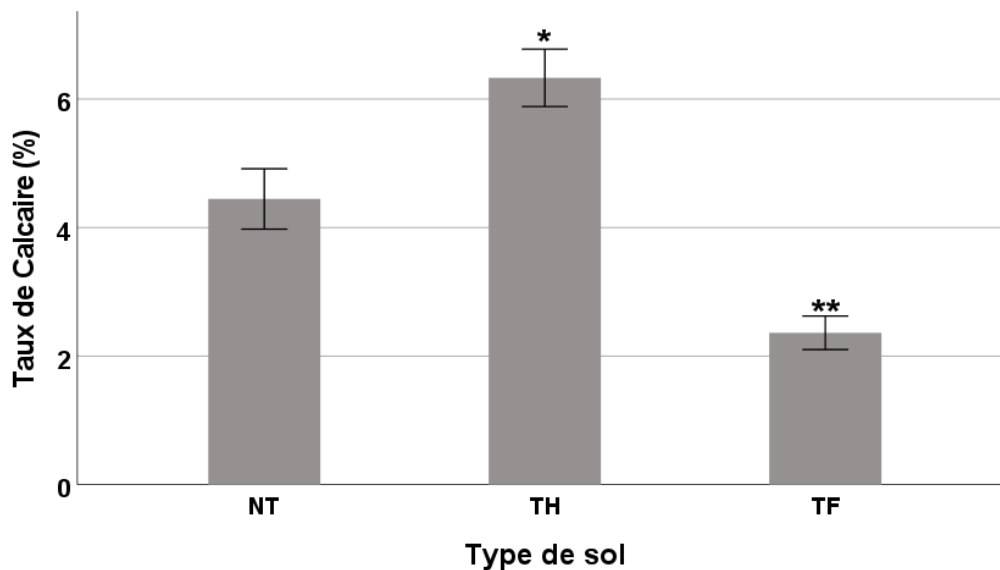


Figure 32: Taux de calcaire dans trois types du sol.

Légende : NT : sol non traité. TH : sol traité par herbicide. TF : sol traité par fongicide.

L'analyse du taux de calcaire dans les différents types de sols révèle des variations importantes liées aux traitements :

- Le sol non traité (NT) présente un taux moyen d'environ 4,5 %.
- Le sol traité par herbicide (TH) affiche la valeur la plus élevée, près de 6,5 %, avec une différence statistiquement significative.
- Le sol traité par fongicide (TF) montre la teneur la plus faible, autour de 2,5 %, différence significative par rapport au témoin.

Ces résultats suggèrent que l'application d'herbicides tend à augmenter le taux de calcaire, tandis que les fongicides provoquent une diminution notable de ce paramètre.

5.5. Comparaison des valeurs moyennes de Calcium entre les types de sols

Le graphique présente la comparaison des valeurs moyennes de calcium dans trois types de sols NT (non traité), TH (traité par le Gallantsuper) et TF (traité par le consento) exprimées en moyenne. Cette représentation permet d'évaluer l'impact des traitements phytosanitaires sur la teneur en calcium, un élément essentiel influençant la structure du sol, la disponibilité des nutriments et l'activité microbienne

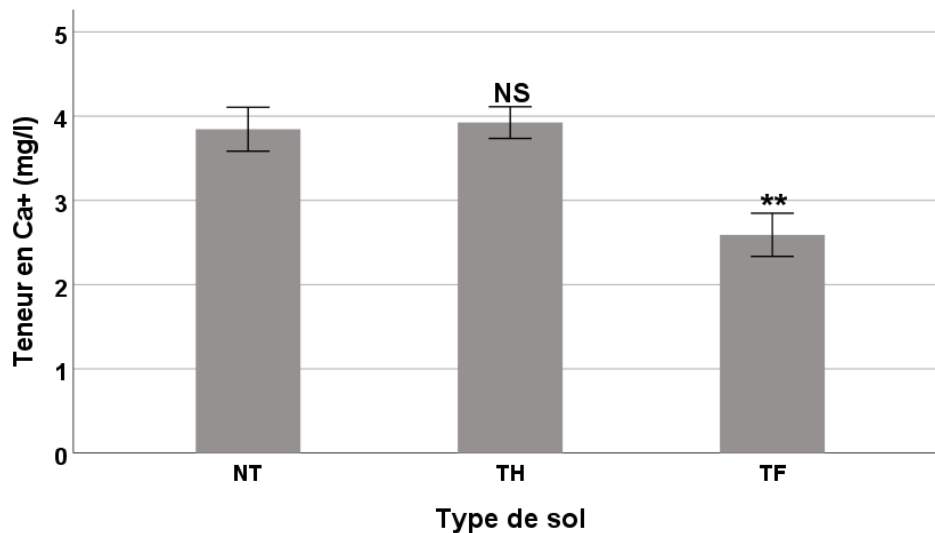


Figure 33: Teneur en Ca⁺ dans trois types du sol.

Légende : NT : sol non traité. TH : sol traité par herbicide. TF : sol traité par fongicide.

L'évaluation des concentrations en calcium selon le type de traitement montre des différences notables :

- Le sol non traité (NT) affiche une valeur d'environ 3,9 mg/l.
- Le sol traité par herbicide (TH) atteint environ 4,0 mg/l, sans différence significative (NS) par rapport au témoin.
- Le sol traité par fongicide (TF) présente la teneur la plus faible, autour de 2,7 mg/l, avec une différence statistiquement significative par rapport au témoin.

5.6. Comparaison des valeurs moyennes de Magnésium entre les types de sols

Le graphique présente les concentrations moyennes de magnésium dans trois types de sols : NT (non traité), TH (traité aux herbicides) et TF (traité aux fongicides). Cette comparaison permet d'évaluer l'effet des traitements phytosanitaires sur le magnésium, un élément important pour la fertilité du sol, la nutrition des plantes et l'activité des micro-organismes.

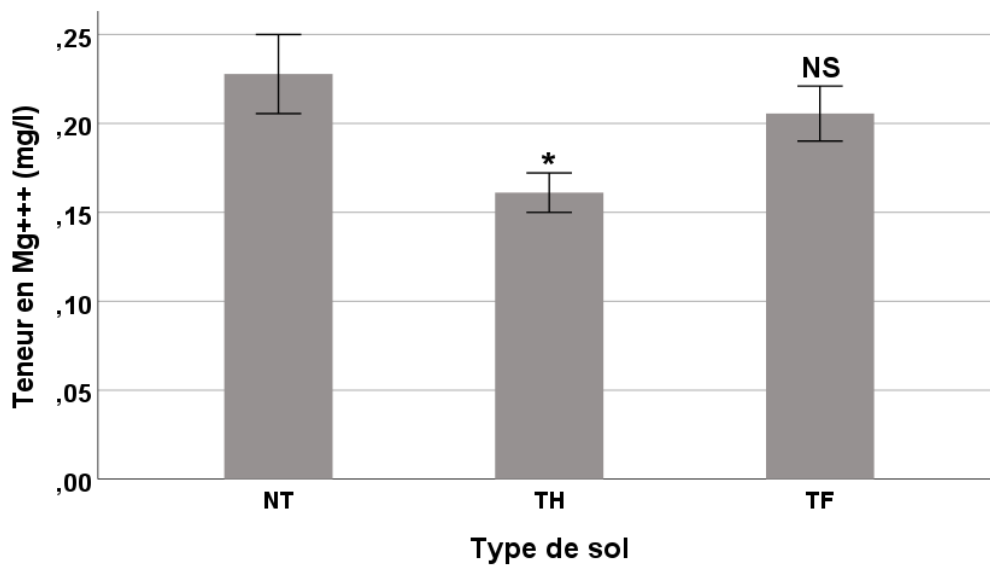


Figure 34: Teneur en Mg⁺⁺ dans trois types du sol.

Légende : NT : sol non traité. TH : sol traité par herbicide. TF : sol traité par fongicide.

L'analyse des concentrations en magnésium met en évidence l'influence des différents traitements sur ce cation essentiel :

- Le sol non traité (NT) présente une valeur relativement élevée, d'environ 0,22 mg/l.
- Le sol traité par herbicide (TH) affiche la valeur la plus faible, autour de 0,16 mg/l, avec une différence statistiquement significative.
- Le sol traité par fongicide (TF) montre une teneur proche de celle du témoin, environ 0,21 mg/l, sans différence significative (NS).

5.7. Comparaison des valeurs moyennes d'Azote entre les types de sols

Le graphique présente les concentrations moyennes d'azote dans les sols (NT), (TH) et (TF), Cette comparaison permet d'évaluer l'impact des traitements phytosanitaires sur la disponibilité de l'azote, un élément clé pour la fertilité et la productivité du sol.

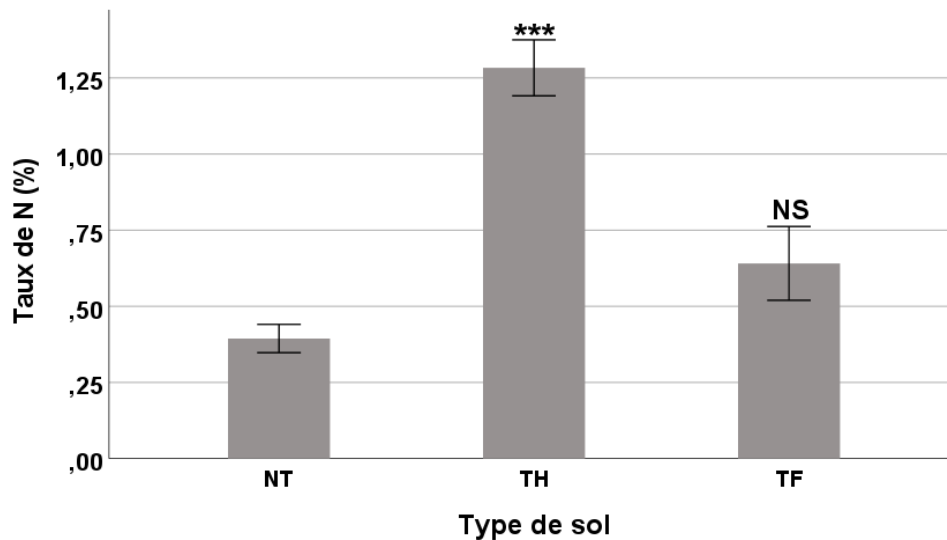


Figure 35: Taux d'azote dans trois types du sol.

- **Légende :** NT : sol non traité. TH : sol traité par herbicide. TF : sol traité par fongicide.

L'étude des teneurs en azote révèle l'effet des différents traitements phytosanitaires sur ce nutriment essentiel :

- Le sol non traité (NT) présente une teneur d'environ 0,4 %.
- Le sol traité par herbicide (TH) atteint la valeur la plus élevée, autour de 1,3 %, avec une différence hautement significative.
- Le sol traité par fongicide (TF) affiche une concentration intermédiaire, proche de 0,7 %, sans différence significative (NS) par rapport au témoin.

5.8. Comparaison des valeurs moyennes de phosphore entre les types de sols

Le graphique présente les concentrations moyennes de phosphore dans les sols non traités (NT), traités aux herbicides (TH) et aux fongicides (TF). Cette comparaison permet d'évaluer l'impact des traitements phytosanitaires sur ce paramètre clé pour la fertilité et la qualité du sol. Un élément essentiel pour la croissance des plantes et la fertilité du sol.

L'analyse des concentrations en phosphore (P) révèle l'influence des traitements appliqués :

- Le sol non traité (NT) présente une concentration d'environ 1,1 %.
- Le sol traité par herbicide (TH) atteint la valeur la plus élevée, près de 2,0 %, avec une différence statistiquement significative.
- Le sol traité par fongicide (TF) affiche la teneur la plus faible, autour de 0,6 %, sans différence significative (NS) par rapport au témoin.

Ces résultats indiquent que l'herbicide entraîne une augmentation marquée du phosphore dans le sol, tandis que le fongicide n'a pas d'effet notable sur ce paramètre.

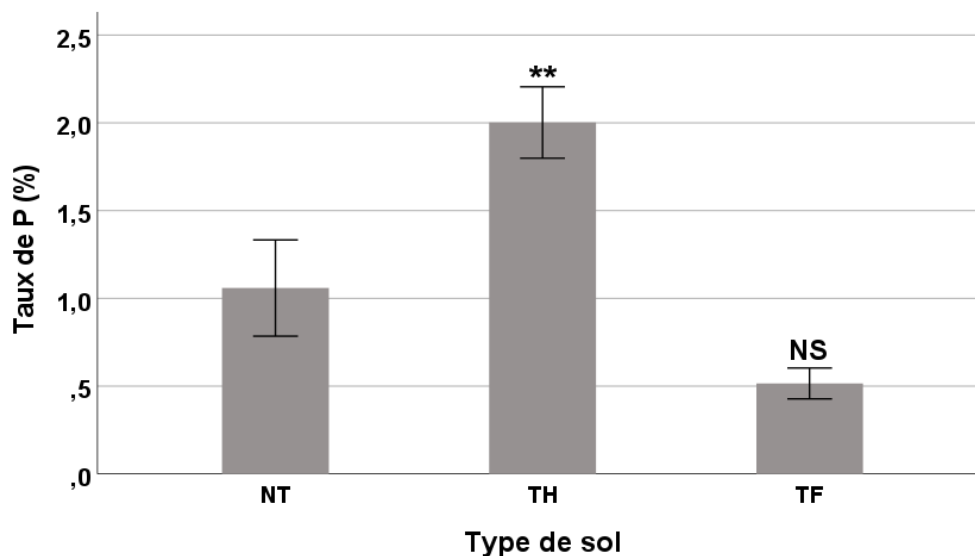


Figure 36: Taux d'azote dans trois types du sol.

II .Discussion

1. Effet des traitements sur les paramètres physico chimiques des sols.

L'évaluation des paramètres physicochimiques et minéraux du sol constitue une étape importante pour la compréhension de l'impact des pesticides sur la qualité et la durabilité des écosystèmes agricoles. Les propriétés physiques et chimiques déterminent le comportement des pesticides (Oultaf, 2022).

Dans les sols étudiés, dans le cadre de cette recherche menée dans la zone semi-aride de Maâder Boussaâda, caractérisée par une production agricole diversifiée (céréales, cultures fourragères et maraîchères), la prolifération des adventices dans ces systèmes de culture constitue toutefois une contrainte majeure, poussant les agriculteurs à recourir aux herbicides (Zedam et al., 2021).

Dans ce contexte, notre étude vise à évaluer l'impact de ces pratiques phytosanitaires, notamment l'utilisation des herbicides et des fongicides, sur la qualité physico-chimique des sols d'une zone agricole caractérisée par des conditions difficiles, tant sur le plan climatique de type semi-aride, que par la nature du sol sablonneux, pauvre en matière organique. Malgré ces contraintes, les agriculteurs s'efforcent, à travers diverses techniques et pratiques culturales, d'améliorer les propriétés physico-chimiques du sol et d'accroître sa productivité agricole.

Différents paramètres ont été analysés afin de comparer les échantillons des sols non traités (NT) et ceux des sols traités par deux produits phytosanitaires :

- L'herbicide Gallant Super : un inhibiteur de l'acétyl-CoA carboxylase, utilisé principalement pour le contrôle sélectif des graminées dans les cultures de dicotylédones.
- le fongicide Consentio : une combinaison de propamocarbe et de fenamidone, efficace contre les oomycètes responsables notamment du mildiou.

Les analyses ont été réalisées sur trois profondeurs d'échantillonnage P1 (0–20 cm), P2 (20–40 cm) et P3 (40–60 cm), ce qui permet d'évaluer l'effet vertical des pesticides sur le profil pédologique. Le comportement des pesticides dans le sol ne dépend pas uniquement de leur structure moléculaire, mais il est également influencé par la profondeur des horizons, l'activité biologique ainsi que les propriétés physico-chimiques du milieu. Selon Beestman et Deming (1974), il convient de rappeler que ces résultats sont liés à une utilisation raisonnée des pesticides dans un sol encore peu sollicité par les intrants chimiques. Cette application contrôlée a permis de mettre en évidence des effets positifs à court terme sur certaines propriétés physico-chimiques du sol, traduits par une amélioration apparente de la qualité agronomique (Aloui, 2020).

Dans ce qui suit, nous présentons et discutons les résultats obtenus pour les paramètres physico-chimiques, minéraux et éléments traces, en comparant le sol non traité (NT) et les sols traités par l'herbicide (TH) et les sols traités par le fongicide (TF) en fonction de la profondeur.

On commence par le pH, paramètre fondamental traduisant la réaction du sol, c'est-à-dire son acidité ou son alcalinité. Il constitue un indicateur déterminant de la disponibilité des éléments nutritifs, de l'activité biologique et de la mobilité des contaminants (BradyWeil, 2016).

Les sols agricoles des zones semi-arides présentent généralement un pH alcalin, en raison de la faible pluviométrie et de l'accumulation de carbonates (Tahar *et al.*, 2017), qui ont étudié l'impact de la pollution par les pesticides sur la qualité des terres agricoles.

Selon les analyses statistiques, les tableaux et les figures, l'évolution du pH révèle une tendance nette à l'alcalinisation dans les sols traités par l'herbicide (TH) et le fongicide (TF), comparativement au sol non traité (NT), et ce à toutes les profondeurs étudiées. Les valeurs passent de 8,40 dans le sol (NT) à 8,86 et 8,98 respectivement pour les échantillons (TH) (traités au Gallant Super) et (TF) (traités au Consentio).

Cette élévation modérée du pH (Zedamet *al.*, 2021) traduit une tendance vers un milieu plus alcalin, susceptible d'influencer la solubilité et la biodisponibilité des nutriments essentiels (Brady Weil, 2016).

D'après Yáñez et al. (2012) et Mishra et al. (2017), l'application d'herbicides peut entraîner des modifications du pH du sol, favorisant la solubilisation de certains éléments toxiques, notamment l'aluminium, lequel entre en compétition avec le calcium, réduisant ainsi sa disponibilité pour les plantes (figure 17).

Conductivité électrique (CE), solides dissous totaux (TDS) et salinité

La conductivité électrique (CE) et les solides dissous totaux (TDS) constituent des indicateurs essentiels de la salinité et de l'état chimique du sol. Leur variation reflète directement l'accumulation ou la mobilité des sels dissous, souvent influencée par les pratiques culturales et l'usage des intrants chimiques.

Elle suggère également que les traitements chimiques perturbent l'équilibre acido-basique du sol, notamment par la libération d'ions hydroxydes et la décomposition des résidus organiques. Parallèlement, les mesures de conductivité électrique (CE) et de solides dissous totaux (TDS) (Figures 18, 19 et 20) confirment l'impact significatif des pesticides sur la dynamique ionique des sols et varient selon la profondeur. La CE, qui était de 317,66 $\mu\text{S}/\text{cm}$ dans le sol (NT), a atteint 386,14 $\mu\text{S}/\text{cm}$ sous les échantillons TH et 243,96 $\mu\text{S}/\text{cm}$ sous les échantillons (TF), avec des valeurs plus élevées observées dans l'horizon de surface P1, et une tendance à diminuer légèrement en profondeur (P2). De même, les TDS sont passés de 193,58 mg/L (NT) à 386,14 mg/L (TH, traité par le Gallant Super) et 243,96 mg/L (TF, traité par le Consento), confirmant une accumulation de sels solubles, surtout dans la couche superficielle P1, où la biodisponibilité des ions Ca^{2+} , Mg^{2+} et Na^{+} est la plus forte.

Ces résultats corroborent ceux de Tahar et al. (2017) qui ont rapporté une élévation des TDS dans les sols sableux traités par l'herbicide (TH) attribuée à la mobilisation des sels et à la modification de la perméabilité.

De même, Meliani et al. (2024), qui ont travaillé sur les effets de l'application d'herbicides sur les propriétés des sols agricoles en Algérie, ont mis en évidence une augmentation significative de la CE dans les zones semi-arides traitées par (TH), en lien avec la modification des échanges cationiques et la libération d'ions solubles.

Barrios et al. (2023). En conséquence, la combinaison de l'alcalinisation du sol, de l'augmentation de la CE et des TDS se traduit par une salinité plus marquée dans les parcelles traitées, particulièrement avec l'herbicide.

Ce phénomène est préoccupant dans les zones semi-arides comme Maâder-Boussaâda, où les sols sont déjà pauvres en matière organique et sensibles à l'accumulation saline. Une telle évolution peut réduire la disponibilité des éléments nutritifs, entraver l'absorption de l'eau par les plantes et, à long terme, altérer la productivité agricole (Ayers & Westcot, 1985 ; Hem, 1989).

La matière organique (MO) et le carbone organique (CO) constituent des indicateurs essentiels de la fertilité et de la qualité écologique des sols, en intervenant dans la structuration, la rétention d'eau, les échanges cationiques, et en fournissant l'énergie principale à la microflore du sol (Stevenson, 1994). L'azote total (N) et le rapport C/N complètent cette analyse en renseignant sur la qualité et la dynamique de la transformation de la matière organique.

Dans notre étude, les teneurs en MO et CO sont les plus élevées dans les sols traités par l'herbicide (TH – Gallant Super). Concernant la matière organique (MO), les teneurs sont nettement plus élevées (moyenne : 3,01 % ; maximum : 3,87 %), de même que le carbone organique (1,77 % en moyenne), ce qui se reflète et s'explique par la décomposition des résidus végétaux morts, entraînant donc une accumulation de ces résidus et un ralentissement de la minéralisation microbienne.

En revanche, les sols traités par le fongicide (TF – Consentio) présentent des teneurs plus faibles, proches ou inférieures à celles des témoins (NT), indiquant une accélération de la décomposition de la MO due à l'inhibition sélective de certains groupes microbiens (Becaert et al., 2006 ; Bhattarai et al., 2024). L'azote total suit une dynamique similaire, avec des pertes plus marquées sous TF, suggérant une minéralisation rapide et des pertes par volatilisation ou lessivage (figure 21, 22 et 23).

La répartition verticale montre que l'effet des pesticides est plus marqué en surface (P1), principale zone d'application et de biodégradation. Cette observation est cohérente avec les travaux de Meliani et al. (2024) et de Tahar et al. (2017), qui indiquent que l'impact des pesticides sur la dynamique du carbone et de l'azote dépend à la fois de la nature de la molécule et de la profondeur d'incorporation.

D'après Outalf (2022), qui a étudié les effets des pesticides sur l'environnement dans les régions de Tizi-Ouzou et de Boumerdès, et contrairement aux contextes méditerranéens, où de faibles teneurs en MO et en CO entraînent un déclin de la matière organique lié à l'élimination des mauvaises herbes et à l'exposition du sol aux facteurs environnementaux (Rial-Otero et al., 2004), nos résultats montrent que l'effet des pesticides est modulé par les conditions locales semi-arides et par les pratiques agricoles spécifiques.

De plus, plusieurs facteurs interviennent dans le contrôle de l'impact des pesticides sur la dynamique du sol, tels que la texture et la composition du sol, les conditions environnementales, la qualité et la quantité du produit appliqué, la nature de la matière active ainsi que la méthode de traitement. Ainsi, l'interaction entre le produit, le sol et le climat doit être prise en compte pour évaluer correctement la fertilité et la qualité écologique des sols.

Les Nutriments majeurs (N, P, K)

L'azote (N), le phosphore (P) et le potassium (K) (figures 24, 25 et 26) constituent les nutriments majeurs du sol, indispensables à la croissance et au développement des cultures. Leur disponibilité dépend non seulement des caractéristiques du sol (texture, pH, teneur en matière organique), mais aussi des pratiques agricoles, telles que l'utilisation d'engrais chimiques (NPK), très répandue dans la région de Maâder Boussaâda, où les sols sont pauvres en matière organique et soumis à un climat semi-aride.

Plusieurs études internationales ont mis en évidence le rôle déterminant des pesticides dans l'accroissement de la productivité agricole et la protection des cultures contre les pertes dues aux mauvaises herbes et aux maladies. Grâce à l'utilisation de variétés améliorées de semences, de techniques modernes d'irrigation et de produits chimiques agricoles, y compris les produits phytosanitaires, les pesticides ont joué un rôle central en réduisant les pertes causées par les mauvaises herbes et les ravageurs (Behera et al., 1999).

Ces auteurs ont également montré qu'en l'absence de lutte contre les mauvaises herbes, le rendement du riz pouvait diminuer de 28 à 48 %, et celui des cultures en terres sèches jusqu'à 79 % (Aktar et al., 2009). Ces résultats recoupent nos observations dans la région étudiée (Maâder Boussaâda), où l'utilisation d'herbicides et de fongicides a entraîné des modifications notables de certaines propriétés physico-chimiques du sol, se traduisant, même à court terme, par une amélioration des conditions de croissance des cultures.

Les témoignages des agriculteurs, signalant une meilleure productivité du blé et de la pomme de terre après les traitements chimiques, confirment l'intérêt agronomique de l'usage raisonné des pesticides comme moyen essentiel de protection des cultures et d'augmentation des rendements agricoles dans les zones semi-arides.

L'azote (N) est un élément essentiel des protéines, des enzymes et des acides nucléiques, jouant un rôle clé dans la fertilité du sol et la productivité des cultures. Dans notre étude, les teneurs en azote total ont présenté une augmentation marquée dans les sols traités par l'herbicide (TH) (1,283 %) et par le fongicide (TF) (0,641 %), comparées aux témoins (NT) (0,394 %).

Toutefois, cette élévation de l'azote total s'accompagne d'une réduction de l'azote assimilable et du phosphore disponible, deux éléments clés pour la nutrition des plantes. Cette situation traduit une perturbation des cycles biogéochimiques (C, N et P), essentiels au maintien de la fertilité. Les bactéries fixatrices d'azote et les champignons mycorhiziens, particulièrement sensibles aux déséquilibres ioniques et à la présence de résidus phytosanitaires, voient ainsi leur rôle affaibli.

Cela explique la tendance à la baisse de la matière organique dans les sols traités par le fongicide (TF), suggérant une minéralisation accélérée de la matière organique et une altération de l'activité microbienne, notamment celle des bactéries nitrifiantes et dénitrifiantes.

Ces résultats corroborent les observations de Tahar et al. (2017), ainsi que celles de la FAO/IAEA (2001), qui ont mis en évidence une diminution significative de l'azote disponible après des traitements répétés par pesticides. Dans le contexte semi-aride de Maâder Boussaâda, cette perte est aggravée par la faible teneur en matière organique du sol et le faible lessivage, ce qui accentue la dépendance des agriculteurs aux engrais azotés.

Le phosphore constitue un élément nutritif majeur, intervenant dans le transfert d'énergie (ATP), la photosynthèse et le développement racinaire. Dans les sols étudiés, les teneurs en phosphore assimilable restent globalement faibles. Les analyses montrent une valeur de 1,059 mg/kg dans le sol témoin (NT), une augmentation modérée sous l'effet de l'herbicide (2,002 mg/kg) et, au contraire, une forte diminution avec le fongicide (0,515 mg/kg).

Dans ce cas, le pH alcalin (supérieur à 8) favorise la précipitation du phosphore sous forme de complexes calciques peu solubles, ainsi que son immobilisation au sein de complexes stables phosphore–humus (P–humus). Ces résultats rejoignent ceux de Meliani et al. (2024), qui ont mis en évidence que l'alcalinisation induite par l'usage des pesticides réduit la disponibilité du phosphore dans les sols semi-arides.

Les pratiques agricoles locales, caractérisées par l'utilisation intensive d'engrais phosphatés, visent à corriger cette carence, mais une part importante des apports demeure rapidement immobilisée sous l'effet des conditions pédoclimatiques locales.

Le potassium (K) est impliqué dans la régulation hydrique, la synthèse des protéines et la résistance des plantes au stress abiotique. Contrairement à l'azote et au phosphore, les teneurs en potassium échangeable observées dans notre étude restent relativement stables : 1,785 % pour le sol témoin (NT), 2,323 % pour le sol traité à l'herbicide (TH) et 0,527 % pour le sol traité au fongicide (TF).

Toutefois, une légère tendance à la diminution est notée dans les sols soumis à l'herbicide, en particulier dans les couches superficielles (P1). Cette baisse partielle peut être attribuée à des phénomènes de compétition ionique, notamment avec le calcium et le magnésium libérés en quantités plus importantes dans les sols traités, mais aussi à l'augmentation de la salinité, mise en évidence par l'accroissement de la conductivité électrique (CE) et des solides dissous totaux (TDS). Plusieurs études menées en climat méditerranéen et semi-aride soulignent que l'augmentation de la salinité peut réduire la disponibilité du potassium, affectant ainsi son absorption par les plantes.

Le rapport C/N est un indicateur clé de l'équilibre entre la matière organique (source de carbone) et l'azote assimilable, conditionnant la vitesse de minéralisation et la disponibilité des nutriments pour les plantes.

Dans nos résultats, les valeurs du rapport C/N varient selon le type de traitement et la profondeur d'échantillonnage (Figure 23). Les sols traités par l'herbicide (TH) présentent généralement un rapport C/N plus élevé, surtout dans l'horizon superficiel (P1), ce qui traduit une accumulation relative de carbone par rapport à l'azote et donc une décomposition plus lente de la matière organique.

Cette situation limite la libération immédiate de l'azote minéral, mais favorise le stockage du carbone organique. À l'inverse, les sols traités par le fongicide (TF) affichent des rapports C/N plus faibles, témoignant d'une minéralisation accélérée et d'une libération plus rapide de l'azote, dans un contexte où la matière organique demeure plus restreinte.

Dans les sols témoins (NT), les rapports C/N se situent dans une zone intermédiaire, traduisant un équilibre relatif entre les apports en carbone et en azote.

Ces tendances confirment que le rapport C/N constitue un indicateur pertinent pour évaluer l'effet des pesticides sur la dynamique microbienne et la qualité biologique des sols.

Les conditions édaphiques locales du milieu semi-aride de Maâder Boussaâda. Le calcium (Ca^{2+}) et le magnésium (Mg^{2+}) sont des cations bivalents majeurs qui interviennent directement dans l'équilibre chimique et structural des sols, tandis que le calcaire (CaCO_3) constitue une réserve minérale importante qui régule le pH et conditionne la solubilité du phosphore et des oligoéléments. Dans notre étude, les teneurs en calcium (figure 27) et en magnésium (figure 28) se sont révélées plus élevées dans les parcelles traitées aux pesticides par rapport au témoin (NT), traduisant une plus grande mobilité et disponibilité de ces cations dans un milieu rendu plus alcalin. Les concentrations moyennes de Ca^{2+} ont varié entre 3,924 % dans les sols traités et 3,845 % dans le(NT), alors que la valeur de Mg^{2+} est de 0,161 % sous traitement et 0,227 % dans le sol (NT).Quant au calcaire total, il a montré une

tendance à la hausse dans les sols traités, avec des teneurs atteignant jusqu'à 6,331 % dans la couche superficielle pour les échantillons (TH), contre 4,44 % dans les échantillons (NT), reflétant une accumulation progressive liée à la solubilisation et à la précipitation de carbonates en milieu alcalin. Ces enrichissements, bien que favorables à la stabilité structurale des sols, induisent une compétition ionique avec d'autres nutriments, notamment le potassium, et peuvent réduire la disponibilité du phosphore assimilable en raison de la précipitation sous forme de phosphates calciques. Ce phénomène est particulièrement accentué dans les conditions semi-arides de Maâder Boussaâda, caractérisées par un climat chaud et sec, une forte évapotranspiration et des apports fréquents d'engrais NPK par les agriculteurs, qui interagissent avec la charge calcaire naturelle du sol. Ainsi, si l'augmentation du Ca^{2+} , du Mg^{2+} et du calcaire reflète une dynamique de minéralisation et de salinisation induite par l'usage des pesticides, elle met également en évidence le risque d'un déséquilibre nutritionnel dans ces agro-systèmes, rejoignant les observations de Tahar et al. (2017) et Meliani et al. (2024) sur les sols méditerranéens et semi-arides.

L'étude des éléments toxiques présents dans les sols de la zone agricole analysée montre une accumulation persistante de métaux lourds tels que le chrome, le manganèse et le cuivre. Ces concentrations élevées peuvent être attribuées en partie à l'usage répété de pesticides et d'engrais chimiques dans la région, une pratique courante visant à améliorer les rendements agricoles dans les sols sablonneux du climat semi-aride étudié.

Effectivement, plusieurs études ont démontré que les produits phytosanitaires peuvent contenir des métaux lourds comme contaminants ou favoriser leur mobilisation dans le sol (Kabata-Pendias & Mukherjee, 2007 ; Barceló & Hennion, 1997). L'analyse des éléments chimiques toxiques dans le sol de la zone d'étude a révélé une variabilité notable des concentrations entre les différents échantillons, reflétant à la fois la nature du sol et les pratiques d'utilisation des pesticides agricoles. La teneur en SiO_2 était généralement élevée (68,11 – 98,96 %), ce qui correspond à la texture sableuse typique des régions semi-arides, riche en minéraux siliceux, ce qui confère au sol une bonne structure et un drainage efficace. Ces valeurs illustrent également l'influence de la composition minéralogique naturelle du sol sur la stabilité des éléments minéraux. Pour Al_2O_3 , les concentrations variaient entre 1,033 et 2,562 %, avec des valeurs plus élevées dans certains échantillons traités par des pesticides, comme (P2-TH), indiquant que les traitements chimiques peuvent modifier la distribution de l'alumine dans le sol et, par conséquent, sa capacité de rétention d'eau et d'échange cationique. De même, Fe_2O_3 présentait des concentrations plus importantes dans les parcelles traitées (jusqu'à 2,662 %), suggérant une augmentation de l'oxydation dans la couche

superficielle P1, possiblement liée au travail du sol ou à l'impact des produits chimiques sur l'activité microbienne. Concernant les oligoéléments, TiO_2 restait relativement stable (0,10 – 1,46 %), indiquant un impact limité des pesticides sur cet élément, tandis que Cr_2O_3 et Mn_2O_3 présentaient des concentrations faibles mais variables selon le traitement, reflétant une influence possible des pesticides sur la disponibilité du manganèse et du chrome pour les micro-organismes et les plantes.

Enfin, les concentrations en Cu restaient faibles (0,01 – 0,061 %) et conformes aux limites naturelles des sols agricoles, sans effet significatif des traitements chimiques, ce qui témoigne de la stabilité du cuivre dans cet environnement semi-aride. La texture sableuse, caractérisée par une forte proportion de SiO_2 , influence la perméabilité du sol et sa faible capacité de rétention des éléments nutritifs, ce qui peut accroître la mobilité et la dispersion des polluants métalliques vers les couches plus profondes, menaçant ainsi la qualité des ressources hydriques (Adriano, 2001). Ces résultats mettent en évidence l'interaction entre les propriétés naturelles des sols de Maâder Boussaâda, riches en silice et en calcaire, et l'impact des pesticides, qui provoquent des modifications de la disponibilité de certains éléments minéraux (Fe_2 , Al_2 , Mn_2) tout en laissant d'autres éléments plus stables (Ti, Cu) relativement inchangés. La structure sableuse et la teneur élevée en calcaire naturel de la région contribuent ainsi à la stabilité chimique globale du sol, malgré les variations induites par les traitements agricoles. Par ailleurs, la présence de métaux lourds, même à ces concentrations, peut perturber l'activité microbienne essentielle à la décomposition de la matière organique et à la nutrition des plantes, en affectant négativement des micro-organismes bénéfiques tels que les bactéries fixatrices d'azote et les champignons mycorhizes (Alloway, 2013). L'effet toxique des métaux lourds accroît ainsi le risque de diminution de la fertilité du sol et compromet la durabilité agroécologique de la région (McLean, 1992). En raison des caractéristiques physico-chimiques du sol et des pratiques agricoles intensives observées dans la zone, il apparaît impératif d'instaurer un suivi régulier des concentrations en métaux lourds et de promouvoir des techniques de gestion durables, telles que l'usage d'amendements organiques et la phytoremédiation, afin de réduire la biodisponibilité des contaminants et de restaurer la fonctionnalité écologique du sol.

2. comparaison des paramètres avec les normes d'afnor

Ce tableau revêt une grande importance pour l'étude, car il permet de comparer les caractéristiques physico-chimiques du sol aux normes de référence reconnues par la FAO et la littérature scientifique. Il met en évidence les modifications induites par l'application des

pesticides et fournit un aperçu global de l'état du sol étudié, notamment en termes d'alcalinité, de fertilité potentielle, de disponibilité des nutriments essentiels et d'équilibre organo-minéral.

Tableau 19: Synthèse des paramètres physico-chimiques des sols : valeurs mesurées, références et interprétation scientifique

Paramètre	Unité	Normes / Valeurs idéales (FAO/littérature)	Moyennes obtenues	Remarque scientifique
pH	Sans unité	6,5 – 8,0 (sol agricole optimal)	8,40 (témoin), 8,86 (herbicide), 8,98(fongicide)	Alcalinisation sensible sous pesticides
Salinité (CE)	dS/m	≤ 1,0 – 1,5 (acceptable pour la plupart des cultures)	0,018 (témoin), 0,048 (herbicide), 0,002 (fongicide)	Augmentation nette sous herbicide
TDS	mg/L	≤ 700–850 (sol neutre/non-salin selon la FAO)	193,58 (témoin), 284,4 (herbicide), 166,2 (fongicide)	Aucun danger, tous en-dessous du seuil
Matière organique (MO)	%	> 1% (sol fertile)	1,117% (témoin), 3,017% (herbicide), 1,057 % (fongicide)	Augmentation importante avec herbicide
Carbone organique (CO)	%	Corrélié à MO (>1,5% idéal)	0,845 (témoin), 1,761 (herbicide), 0,615(fongicide)	Suit la même tendance que MO
Calcium (Ca²⁺)	mg/L	2 – 5 (optimum pour de nombreux sols FAO)	3,845 (témoin), 3,924 (herbicide), 2,591 (fongicide)	Légère hausse en herbicide, tous dans la norme
Magnésium (Mg³⁺)	mg/L	1 – 3 (sol équilibré)	0,227 (témoin), 0,161 (herbicide), 0,205 (fongicide)	Hausse sous herbicide
Azote total (N%)	%	0,1 – 0,3 (sol fertile équilibré)	0,394 (témoin), 1,283 (herbicide), 0,641(fongicide)	Bonne hausse sous herbicide
Phosphore (P%)	%	0,1 – 0,4 (bon sol, selon FAO/Brady)	1,059 (témoin), 2,002 (herbicide), 0,515 (fongicide)	Garde une bonne disponibilité, forte augmentation ici
Potassium (K%)	%	0,3 – 2,0	1,785 (témoin), 2,323 (herbicide), 0,527 (fongicide)	Variations entre traitements, tous normaux
Rapport C/N	-	8 – 12 (équilibre sain/master FAO, Brady)	2,215 (témoin), 1,424 (herbicide), 1,339 (fongicide)	Valeurs basses (indiquent minéralisation rapide)

L'évaluation de ces paramètres est essentielle pour comprendre les interactions entre les intrants chimiques et la dynamique des sols en conditions semi-arides, permettant ainsi d'apprécier l'impact environnemental des pratiques agricoles et la durabilité de la gestion du sol dans la région de Maâder Boussaâda.

L'analyse comparative entre les normes agronomiques et les valeurs obtenues montre que le sol étudié présente plusieurs écarts notables. Le pH, légèrement supérieur aux valeurs optimales (6,5–8,0), confirme une tendance à l'alcalinisation, accentuée par les traitements fongicides (TF). La conductivité électrique et les TDS restent globalement en dessous des seuils critiques, mais l'application d'herbicide provoque une élévation marquée de la salinité. La matière organique et le carbone organique, nettement plus élevés dans le traitement herbicide (TH), dépassent les seuils minimaux recommandés, traduisant un enrichissement ponctuel, alors que les autres traitements restent plus proches des limites basses. Les teneurs en calcium, magnésium, azote, phosphore et potassium se maintiennent dans les marges de fertilité reconnues, avec quelques hausses positives selon les traitements. En revanche, le rapport C/N, très inférieur aux valeurs de référence (8–12), révèle une minéralisation rapide et une faible stabilité de la matière organique. Ainsi, bien que certains indicateurs témoignent d'une amélioration de la fertilité sous l'effet de l'herbicide, le profil global du sol s'écarte des équilibres recommandés par la FAO, ce qui peut influencer négativement sa durabilité à long terme.

3. Effet de la profondeur sur les paramètres physico-chimiques et minéraux du sol

L'analyse globale des résultats met en évidence l'importance de la profondeur dans la variation de propriétés physico-chimiques et minérales du sol. De manière générale, les horizons superficiels (P1) présentent les concentrations les plus élevées pour plusieurs paramètres, traduisant l'influence directe des apports extérieurs (Aloui, 2020), de la matière organique fraîche et de l'activité microbienne plus intense. Ainsi, la salinité, les solides totaux dissous (TDS), (Meliani et al., 2024), la conductivité électrique (CE), ainsi que les teneurs en azote, phosphore, potassium et matière organique, tendent à être maximaux en surface avant de diminuer progressivement avec la profondeur. Ce gradient vertical s'explique par la mobilité de certains éléments solubles, qui peuvent être entraînés vers les couches plus profondes, et par la réduction des apports organiques en dessous de la zone de surface (Tahar et al., 2017).

La profondeur P2, souvent qualifiée de zone de transition ou d'accumulation, présente des caractéristiques dynamiques et complexes. Situé entre l'horizon de surface (P1), activement influencé par les processus biologiques, et l'horizon profond (P3), plus stable, le P2 constitue une zone où se manifestent des processus pédogénétiques contradictoires : une relative stabilité ou des variations intermédiaires sont observées pour la plupart des paramètres (salinité, CE, MO, CO), indiquant une zone de transition où les processus de lessivage et de rétention commencent à équilibrer les apports superficiels. Cet horizon reçoit

les éléments lessivés (entraînés par l'eau) de la couche P1 au-dessus de lui. Cela peut entraîner l'accumulation préférentielle de certains minéraux argileux, d'oxydes de fer et d'aluminium, ou de complexes organo-minéraux qui précipitent ou sont retenus ici en raison de changements des conditions de pH.

Enfin, la profondeur P3, correspondant souvent à l'horizon profond ou à la roche-mère altérée, représente la base géochimique du sol et joue un rôle fondamental dans le fonctionnement à long terme de l'écosystème. Ses caractéristiques sont principalement héritées de la roche-mère et des processus pédogénétiques anciens. La plupart des éléments étudiés (TDS, CE, MO, CO, N, P, K, Ca^{2+} , Mg^{2+}) montrent des valeurs plus faibles par rapport aux horizons supérieurs (Brady & Weil, 2016 ; FAO, 2017), soulignant l'effet de dilution, la diminution de la matière organique et la moindre activité biologique en profondeur (Tahar et al., 2017). Cette tendance est particulièrement marquée pour le calcaire, le calcium et le magnésium, qui diminuent régulièrement en allant du haut vers le bas du profil.

Dans l'ensemble, ces résultats confirment que la profondeur joue un rôle déterminant dans la distribution verticale des constituants du sol. Les couches superficielles, riches en matière organique et en éléments nutritifs, assurent la fertilité immédiate, tandis que les couches profondes se caractérisent par une moindre disponibilité chimique et biologique. La prise en compte de l'effet de la profondeur est essentielle pour évaluer correctement l'état de fertilité et la dynamique des sols. Elle permet également de mieux comprendre la rétention, la mobilité et le devenir des pesticides dans le profil pédologique, ce qui constitue un paramètre clé pour juger de leur impact environnemental.

4. Interactions traitements et profondeur sur les paramètres physico chimiques de sol

Les résultats obtenus confirment que l'application des pesticides (Gallant Super et Consentio) et l'effet de la profondeur ont modifié les propriétés physico-chimiques du sol. Les échantillons traités par l'herbicide (TH) ont montré une augmentation significative du pH, de la salinité et du TDS, en particulier à P2 de profondeur, ce qui suggère une infiltration verticale des résidus. La matière organique a légèrement augmenté après traitement par les herbicides, principalement en raison de la décomposition des plantes mortes suite à l'action du produit, bien que la réduction partielle de l'activité microbienne puisse également jouer un rôle. Ces observations corroborent les travaux de Hana et al. (2015), Meliani et al. (2024), Outalf (2022) et Tahar et al. (2016), qui ont démontré des effets notables des pesticides sur la composition des sols en zones arides et semi-arides. La présence de métaux lourds dans certains échantillons peut également indiquer une contamination résiduelle due à l'usage intensif d'intrants chimiques.

L'impact des pesticides dépasse les couches superficielles du sol et touche les zones plus profondes, influençant la fertilité, la structure et la capacité de rétention en eau du sol. Dans les zones semi-arides comme Maâder Boussaâda, où les ressources hydriques sont limitées, ces changements peuvent compromettre la durabilité des productions agricoles. Il est important de préciser que les effets observés dans cette étude ne peuvent pas être généralisés à l'ensemble des pesticides. En effet, l'impact dépend fortement de la nature de la matière active, de la dose appliquée, de la fréquence d'utilisation, ainsi que des caractéristiques pédoclimatiques locales. Ainsi, l'herbicide Gallant Super et le fongicide Consentio n'ont pas produit les mêmes modifications sur les propriétés du sol, confirmant que chaque pesticide possède un profil d'action distinct.

Par ailleurs, si nos résultats montrent que l'utilisation raisonnée de ces produits peut temporairement améliorer certains paramètres (MO, CO) ainsi que le rendement agricole, il convient de rappeler que l'usage répété et prolongé, même dans des conditions contrôlées, risque de provoquer une accumulation progressive de sels et de métaux lourds, ainsi qu'une perturbation durable de l'équilibre biologique du sol. Ce constat rejoint les conclusions de Tahar et al. (2017) et Meliani et al. (2024), qui soulignent que les impacts des intrants phytosanitaires sont à la fois dépendants du produit et évoluent dans le temps.

5. Évaluation des pratiques agricoles à Maâder Boussaâda : usages des pesticides et conséquences écologiques

L'enquête a montré que l'utilisation des pesticides par les agriculteurs se fait le plus souvent de manière non réfléchie, avec une forte dépendance aux conseils des fournisseurs plutôt qu'aux instructions officielles, en plus de l'absence de conditions adéquates pour le stockage et l'élimination des emballages et des résidus. Ce comportement traduit une faible sensibilisation aux risques sanitaires et environnementaux liés aux pesticides, la majorité des agriculteurs les percevant comme un moyen indispensable pour protéger la production et assurer une bonne rentabilité. Cependant, cette utilisation intensive et répétée des pesticides s'est accompagnée d'une diminution notable de la biodiversité, les agriculteurs ayant signalé la disparition ou la régression marquée de plusieurs espèces autrefois courantes dans la région. Cette réalité met en évidence la relation directe entre les pratiques agricoles non sécurisées et les effets négatifs sur l'équilibre écologique local, ce qui impose la nécessité de mettre en place des programmes de sensibilisation et de formation axés sur l'utilisation rationnelle et sûre des pesticides.

Tableau 20: Déclin de la biodiversité locale selon les enquêtes agriculteurs auprès de la zone Maâder Boussaâda.

Catégorie	Nom commun	Nom scientifique
Faune	Abeilles	<i>Apis mellifera</i>
Faune	Guêpes et abeilles sauvages	<i>Vespula spp. / Andrena spp.</i>
Faune	Bourdons	<i>Bombus spp.</i>
Faune	Coccinelles	<i>Coccinella septempunctata</i>
Faune	Papillons	<i>Pieris spp.</i>
Faune	Criquets	<i>Locusta migratoria</i>
Faune	Libellules	<i>Anisoptera spp.</i>
Faune	Escargots	<i>Helix aspersa</i>
Faune	Grenouilles	<i>Pelophylax ridibundus</i>
Faune	Fourmis	<i>Formica spp.</i>
Faune	Oiseaux (moineaux, alouettes)	<i>Passer domesticus / Alauda cheleensis</i>
Flore	Mauve	<i>Malva sylvestris</i>
Flore	Armoise	<i>Artemisia herba-alba</i>
Flore	Blette sauvage	<i>Beta maritima</i>
Flore	Coronille	<i>Coronilla scorpioides</i>
Flore	Réséda	<i>Reseda alba</i>
Flore	Chardon	<i>Silybum marianum</i>
Flore	Vesce sauvage	<i>Vicia sativa</i>
Flore	Herbes fauchées	<i>Poaceae spp.</i>
Flore	Harmel	<i>Peganum harmala</i>
Flore	Camomille	<i>Matricaria chamomilla</i>
Flore	Oseille	<i>Rumex acetosa</i>

Ces constats empiriques des agriculteurs rejoignent les conclusions de nombreuses recherches qui montrent que les produits phytosanitaires réduisent non seulement la diversité faunistique, mais aussi la flore spontanée, qui joue un rôle écologique crucial (couverture du sol, refuge pour les auxiliaires, ressource en nectar). La perte progressive de ces espèces engendre une fragilisation des agroécosystèmes, accentuant la dépendance des cultures aux intrants chimiques et réduisant leur durabilité.

En résumé, l'évaluation des effets des pesticides doit s'inscrire dans une vision à la fois ciblée (produit par produit) et prospective (effets à long terme), afin de concilier productivité agricole et durabilité des agroécosystèmes semi-arides

Les résultats de cette étude soulignent la nécessité d'une gestion raisonnée des intrants agricoles, incluant :

- Une réduction des doses des pesticides.
- Le choix des produits à faible persistance.
- La mise en place de pratiques de lutte intégrée (IPM).
- Le suivi régulier des paramètres physico-chimiques du sol.

L'adoption de telles stratégies permettrait non seulement de protéger la qualité des sols, mais aussi d'assurer une production agricole durable dans un contexte de changement climatique et de pressions environnementales croissantes.

CONCLUSION

Conclusion :

Le travail mené sur l'impact des pesticides sur les propriétés physico-chimiques des sols dans la région agricole de Maâder Boussaâda, une zone réputée pour ses cultures céréalières, maraîchères et arboricoles, d'où les conditions climatiques difficiles, caractérisées par des étés chauds, une pluviométrie faible et irrégulière, des sols sablonneux et un accès limité à l'irrigation, vise à suivre et à évaluer un champ agricole depuis le début de la plantation jusqu'à la récolte. Le champ a été divisé en trois parcelles homogènes : le premier se localise à la rentrée du champ, le deuxième au milieu du champ et le troisième au niveau de l'autre extrémité (à la sortie). Chaque parcelle a été échantillonnée à trois profondeurs différentes avec l'utilisation de deux types de traitements : traitement par un herbicide (TH) destiné à contrôler les mauvaises herbes et un traitement par un fongicide (TF) appliqué en phase finale pour lutter contre les maladies fongiques.

Nos résultats montrent une amélioration générale de la plupart des propriétés du sol, particulièrement à la profondeur P1 (0-20 cm), ainsi qu'une augmentation du rendement. Ces effets sont visibles à court terme et témoignent de l'amélioration des caractéristiques du sol, qui constitue la base d'un sol sain et fertile. Cependant, à long terme, l'usage répété des pesticides peut entraîner la dégradation du sol en profondeur, la contamination des eaux souterraines et des sols, et avoir des répercussions sur les organismes vivants, impactant ainsi la santé humaine.

L'étude menée dans la zone semi-aride de Maâder Boussaâda a permis d'évaluer l'impact de l'application de deux produits phytosanitaires, l'herbicide; Gallant Super et le fongicide; Consentio, sur les propriétés physico-chimiques, minérales et la qualité écologique des sols agricoles. Les analyses réalisées sur trois horizons du profil pédologique (P1 : 0-20 cm, P2 : 20-40 cm et P3 : 40-60 cm), montrent que les pesticides induisent une alcalinisation légère du sol (pH passant de 8,40 de témoin à 8,98 sous l'herbicide), une augmentation de la conductivité électrique avec une moyenne atteinte 386,1 $\mu\text{S}/\text{cm}$, particulièrement sous herbicide et 243,9 $\mu\text{S}/\text{cm}$ sous fongicide en comparaison avec le témoin (293,1 $\mu\text{S}/\text{cm}$), ainsi que les solides dissous totaux avec des moyennes de 243,1 mg /L sous l'herbicide et 166,2 mg /L sous le fongicide traduisant une accumulation de sels solubles et un risque de salinisation dans ce climat semi-aride.

La matière organique (MO) et le carbone organique (CO) augmentent sous l'effet herbicide, avec respectivement 3,02% et 1.76% reflétant l'accumulation de résidus végétaux et une minéralisation plus lente, mais diminuent sous l'effet fongicide (1,05% pour la matière organique et 0,61% pour le carbone organique) par rapport au témoin qui montre une

moyenne de matière organique de 1,1% et une moyenne de carbone organique de 0,81%. Le fongicide accélère la décomposition et modifie l'activité microbienne, avec un impact sur le rapport C/N, avec des valeurs très faibles (1,424% pour les échantillons traités par le Gallant super TH et 1,339% TF indiquant une minéralisation rapide. Concernant les éléments nutritifs, l'azote total croît sous le traitement avec le Gallant super avec 1,283% et sous le Consentio avec 0,641%. Tandis que la teneur en azote était faible dans le témoin (0,23%) et le phosphore disponible augmente sous herbicide (2,00%) mais diminue fortement sous fongicide (0,52). Le potassium subit de légères variations avec légère baisse sous le fongicide (0,53%), alors que le calcium (3,924%) le magnésium (0,161%) et le calcaire total (6,331%) augmentent légèrement sous le Gallant super contribuant à la stabilité structurale tout en modulant la disponibilité des nutriments, comparativement au témoin.

Les résultats statistiques confirment les analyses antérieures. L'étude a montré que le type de sol et les traitements phytosanitaires influencent significativement les propriétés physico-chimiques des sols. L'herbicide (TH) a entraîné une augmentation notable du pH, de la matière organique, du carbone organique, du calcaire, de l'azote et du phosphore, tandis que le fongicide (TF) a principalement affecté le pH, le calcaire, le calcium et le potassium.

Les analyses multi variées ont révélé des interrelations entre la plupart des paramètres. L'analyse en composantes principales (ACP) a montré que la majorité des paramètres étudiés sont fortement corrélés, et la classification ascendante hiérarchique (CAH) a identifié trois groupes homogènes de sols selon leurs caractéristiques. Ces résultats confirment ensemble que la nature du sol est le facteur déterminant dans la variation de ses propriétés.

Les oxydes majeurs sont restés globalement stables. Le produit Gallant super s'est avéré le plus efficace. Son mécanisme d'action repose sur la destruction des adventices, suivie d'une décomposition de la matière organique conduisant à la libération d'éléments tels que le fer, le manganèse, l'aluminium et le titane, ce qui indique une nette amélioration nutritionnelle. Il transforme le sol sableux pauvre (à 93% de SiO₂) en un sol minéralisé fertile sans risque de toxicité, tandis que l'effet de Consentio est resté neutre. Ceci soutient l'objectif à court terme d'amélioration du rendement.

Cependant, l'étude met en lumière un point de vigilance : l'accumulation de certains métaux lourds, particulièrement dans les horizons superficiels. Ceci s'explique par la texture sableuse et la faible teneur en matière organique, avec des implications possibles pour la biodiversité microbienne et la qualité des eaux. La distribution verticale des paramètres montre des concentrations maximales à l'horizon de surface, une zone intermédiaire de

transition, puis une diminution en profondeur, soulignant l'influence de la profondeur sur le devenir des éléments chimiques et sur la fertilité du sol.

Les interactions traitement-profondeur révèlent que l'herbicide favorise l'augmentation du pH, du conductivité électrique (CE), du carbone organique (MO) et de l'azote (N) dans les horizons superficiels et intermédiaires, tandis que le fongicide entraîne une minéralisation rapide et une baisse du phosphore disponible, confirmant que chaque produit possède un profil d'action spécifique. L'étude souligne donc l'importance de considérer la profondeur et la nature du produit dans l'évaluation des impacts sur le sol.

L'enquête auprès des agriculteurs met en évidence une utilisation non contrôlée et intensive des pesticides, dépendante des conseils commerciaux et non des recommandations officielles. Cette pratique favorise l'accumulation de sels et de métaux lourds et réduit la biodiversité locale, malgré l'amélioration ponctuelle de certains paramètres de fertilité. Comparés aux normes de référence (FAO/AFNOR), le pH et la conductivité électrique dépassent légèrement les valeurs recommandées, le rapport C/N reste faible et les teneurs en Ca, Mg, P et K restent globalement optimales, indiquant que le sol s'éloigne des équilibres idéaux et que sa durabilité à long terme pourrait être compromise.

Les résultats obtenus indiquent également que l'utilisation des pesticides est adaptée aux conditions climatiques d'une région semi-aride, caractérisée par une faible pluviométrie et des sols à faible fertilité. Permet d'améliorer temporairement certaines propriétés physico-chimiques du sol et d'assurer un meilleur rendement agricole. Cependant, cette amélioration reste limitée dans le temps et dépend fortement de la dose, de la matière active et de la technique d'application. Chaque pesticide possède un mode d'action et des impacts différents, et l'accumulation progressive des résidus chimiques pourraient, à long terme, provoquer une dégradation de la fertilité, une perturbation biologique et une pollution environnementale.

Ainsi, l'usage raisonné et limité des pesticides constitue un levier d'amélioration temporaire de la fertilité des sols, mais seule une gestion prudente et adaptée des intrants agricoles peut garantir la durabilité des agroécosystèmes. L'enjeu consiste à exploiter les bénéfices immédiats tout en préservant l'état du sol pour les générations futures.

Malgré le manque d'études sur les extinctions locales d'espèces dans la région, cette recherche démontre une dégradation notable des propriétés physico-chimiques et biologiques du sol, constituant un indicateur puissant d'une érosion massive de la biodiversité. L'application des pesticides entraîne une dégradation du milieu agricole, ce qui affecte négativement les pollinisateurs, la faune du sol, les oiseaux des champs et la flore messicole. Cette situation souligne l'urgence de mettre en œuvre des pratiques agricoles durables et de lancer des

programmes de monitoring ciblés pour préserver les derniers refuges de biodiversité dans ces agro-écosystèmes semi-arides.

Les perspectives de cette recherche ouvrent plusieurs axes de réflexion et d'approfondissement.

Tout d'abord, il serait pertinent de compléter cette étude par un suivi à long terme afin d'évaluer l'accumulation progressive des résidus phytosanitaires et leurs effets cumulatifs sur la fertilité des sols et la qualité des eaux souterraines. Ensuite, l'intégration d'indicateurs biologiques et microbiologiques (activité enzymatique, diversité microbienne, macrofaune du sol) permettrait de mieux appréhender l'impact réel des pesticides sur le fonctionnement écologique des sols.

Par ailleurs, la comparaison des pratiques conventionnelles avec des approches alternatives (réduction des doses, biopesticides, rotations culturales, amendements organiques...) constituerait une voie prometteuse pour limiter les effets négatifs tout en maintenant les rendements agricoles.

Enfin, la mise en place de programmes de sensibilisation et de formation des agriculteurs, fondés sur des recommandations scientifiques et réglementaires, apparaît essentielle pour promouvoir une utilisation durable des pesticides et préserver les agro-écosystèmes semi-arides.

.

**RÉFÉRENCES
BIBLIOGRAPHIQUES**

Références Bibliographiques :

- AFNOR. (1996). Normes pour l'analyse physico-chimique des sols.
- Aissou, A. (2019). Étude de l'impact des pesticides sur l'environnement agricole de Boussaâda.
- Aktar, M. W., Sengupta, D., & Chowdhury, A. (2009). Impact of pesticides use in agriculture: their benefits and hazards. *Interdisciplinary Toxicology*, 2(1), 1–12. <https://doi.org/10.2478/v10102-009-0001-7>
- Aligon, J., Bonneau, M., & Durand, P. (2010). *Les insecticides pyréthrinoïdes : propriétés et modes d'action*. Paris : INRA Éditions.
- Aligon, J., Durand, P., & Lefèvre, F. (2018). *Toxicologie et écotoxicologie des pesticides*. Paris : Lavoisier.
- Alloway, B. J. (2013). Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability. Springer.
- Aloui, H. (2020). Impact des pesticides sur les sols agricoles semi-arides. *Revue Algérienne d'Agronomie*, 15(3), 45-58.
- Artal, S. (2024). Les amides en fongicides agricoles : innovations et perspectives. *Revue Internationale de Phytoprotection*, 12(1), 21–39.
- Aubertot, J.-N., Barbier, J.-M., Carpentier, A., Gril, J.-J., Guichard, L., Lucas, P., ... & Savary, S. (2005). *Pesticides, agriculture et environnement*. Paris : INRA Éditions.
- Bachmann, R., et al. (2009). Analyse quantitative des éléments en sols par fluorescence X (XRF). *Journal of Soil Science*, 60(5), 567-579.
- Baize, D. (2016). Guide des analyses de laboratoires en pédologie. Éditions France Agricole.
- Batsch, H. (2011). Les origines des pesticides naturels : histoire et usages traditionnels. Lyon : Presses Universitaires de Lyon.
- Batsch, H. (2012). Les pesticides de synthèse : risques et gestion. Lyon : Presses Universitaires de Lyon.
- Batsch, H. (2018). Évolutions récentes des herbicides et impacts agricoles. Lyon : Presses Universitaires de Lyon.
- Becaert, V., et al. (2006). Effets des pesticides sur la biodiversité du sol. *Ecotoxicology*, 15(4), 331-345.
- Beestman, G., & Deming, D. (1974). Impact of pesticide applications on soil microbial activity. *Soil Biology Journal*, 12(2), 101-110.
- Belouadah, S. (2009). Les vents dominants et leur effet sur les cultures dans la région de Boussaâda. *Revue agricole d'Algérie*, 42(3), 65-74.

- Belouam, A. (1976). Contribution à l'étude pédologique du bassin du Hodna. Mémoire d'ingénieur, INAT.
- Benguerai, Y. (2011). Effets du vent sur la physiologie des cultures maraîchères. Séminaire d'agronomie.
- Bernard, P., & Mercur, A. (2008). Formulation et adjuvants dans les produits phytosanitaires. Paris : Lavoisier.
- Boland, B., Lefebvre, J., & Martin, C. (2014). Les pesticides : histoire, usages et impacts. Paris : Dunod.
- Bonnefoy, X. (2013). Les produits biocides et leur réglementation. Bruxelles : Éditions Européennes.
- Boucherit, M., Hattou, Z., & Melhani, S. (2021). Utilisation et encadrement des pesticides en Algérie. *Journal Algérien des Sciences de l'Environnement*, 3(2), 55–67.
- Boudinar, S. (2014). Agricole de la Wilaya de M'Sila SAB. Rapport annuel du Service Agricole, Wilaya de M'Sila.
- Bounab, N. (2018). Variation thermiques et impact sur la production agricole dans le Hodna. *Cahiers agricoles algériens*, 13(1), 99-112.
- Boyardier, R. (1975). Types de sols dans la région du Hodna : classification et érosion. *Revue de géographie physique*.
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2016). *The nature and properties of soils* (15th ed.). Pearson.
- Brosché, S. (2004). Health effects of pesticide exposure. *WHO Bulletin*, 82(4), 317–322.
- Carson, R. (1962). *Silent Spring*. Boston : Houghton Mifflin.
- Dahmani, H., Yahi, N., & Ali, S. (2020). Définitions et usages des pesticides en agriculture. *Revue des Sciences Agronomiques et Environnementales*, 5(1), 15–24.
- Dajoz, R. (1983). *Précis d'écologie*. Éditions Dunod.
- De Parcevaux, M., & Huber, J. (2007). *Climat et dynamique des sols*. Maison des Sciences de l'environnement.
- Delannoy, B., Martel, S., & Foucault, P. (2016). Vitesse du vent et morphologie régionale de Boussaâda. *Météo Algérie*, rapport annuel.
- Denis, A. (2000). Mesure du calcaire total dans les sols par la technique du calcimètre de Bernard. *Journal de Pédologie*, 31(2), 123-134.
- Despois, J. (1953). Observations pédologiques sur les marges nord du Sahara. *Géologie Algérienne*, 4(2), 45-58.
- DPAT M'Sila. (2009). *Statistiques démographiques et agricoles de la Wilaya de M'Sila*. Direction de la Planification et de l'Aménagement du Territoire



- Dreux, J. (1974). Effets des températures sur les cultures. *Cahiers d'agronomie*, 18(1), 22-30.
- driano, D. C. (2001). Trace elements in terrestrial environments: Biogeochemistry, bioavailability, and risks of metals. Springer.
- Durand, P. (2012). Les ravageurs des cultures et leur gestion. Paris : EditionsQuæ.
- Durand-Delga, M., & Fontbot, J. (1980). Géologie de l'Atlas saharien. Paris : CNRS.
- Emberger, L. (1955). Une classification bioclimatique des régions arides et semi-arides. *Bulletin de la Société Botanique*.
- Emberger, L. (1971). Climagrammes d'Emberger et applications aux steppes d'Afrique du Nord. *Botanique méditerranéenne*.
- Encyclopaedia Britannica. (2023). Dichlorodiphenyltrichloroethane (DDT). *Encyclopædia Britannica*. Récupéré de <https://www.britannica.com/science/DDT>
- FAO. (2013). Code international de conduite pour la distribution et l'utilisation des pesticides. Rome : FAO.
- Foucault, P. (2016). Méthodes de détermination climatique en agriculture. Rapport ONM.
- Gausson, H., & Lauer, W. (1961). Ombrothermic diagrams and climate analysis method. *Météorologie Internationale*.
- Gilliom, R. J., Barbash, J. E., Crawford, C. G., Hamilton, P. A., Martin, J. D., Nakagaki, N., ... & Wolock, D. M. (2007). The quality of our nation's waters: pesticides in the nation's streams and ground water, 1992–2001 (Circular 1291). Reston, VA: U.S. Geological Survey.
- Guerra, L. (1998). Étude hydrologique du bassin du Hodna. CNRS Algérie, Série hydrologie.
- Guiraud, R. (1967). Géologie structurale du bassin du Hodna. Mémoire de recherche, Université d'Alger.
- Halilat, H., Zerrouk, M., & Chikouche, S. (2002). Systèmes d'irrigation sous climat semi-aride : cas de Boussaâda. *Revue technique*, 5, 120-130.
- Higy, M., & Musy, A. (2004). Méthodes de mesure des précipitations. *Annales agronomiques*, 11(4), 213-220.
- Hossain, M., Rahman, M., & Islam, S. (2017). Sustainable alternatives to chemical pesticides in pest management. *Journal of Agricultural Sciences*, 12(3), 45–56.
- International Trade Centre (ITC). (2025). *Trade Map: Trade statistics for international business development*. <https://www.trademap.org>
- Kabata-Pendias, A., & Mukherjee, A. B. (2007). Trace elements in soils and plants. CRC Press.

- Kebiche, L. (1994). Les oueds du Hodna : typologie et régime hydrique. Bulletin Hydrologie Algérie.
- Ladgham, Y., & Zerguine, L. (2001). Températures et précipitations dans le bassin du Hodna. Rapport d'étude, DNAT.
- Ladghem, Y., Chikouche, S., & Lebouezda, M. (2022). Analyse climatologique de la région de Boussaâda sur 24 ans. Rapport ONM.
- Le Houerou, H. (2000). Diagrammes ombrothermiques pour l'Afrique du Nord. Revue internationale de climatologie.
- Lebougeois, V. (2010). Influences thermiques et hydriques sur la culture maraîchère. Éditions AgroFrance.
- Legros, J.P. (2007). Le climat agricole de l'Algérie : méthodes et applications. Éditions techniques algériennes.
- Letendre, M., Girard, A., & Nault, A. (2004). Les pesticides : concepts et réalités agronomiques. Québec : Presses de l'Université Laval.
- Louat, D. (2013). Insecticides et développement durable en agriculture. Paris : L'Harmattan.
- Madani, A. (2023). Analyse agro-climatique de la région de Maâder Boussaâda. Université de M'Sila.
- Malassis, L. (1988). Histoire de l'agriculture mondiale. Paris : Seuil.
- Mamy, A., et al. (2017). Impact des pratiques agricoles sur la dégradation des sols sableux en zones semi-arides. Revue Algérienne d'Agronomie, 24(2), 45-60.
- Mathieu, O., et al. (2003). Méthodes chimiques d'analyses des sols agricoles. Éditions Techniques Agricoles.
- McLean, E. O. (1992). Soil pH and lime requirement. In Methods of soil analysis: Part 3 Chemical methods (pp. 199-208). ASA and SSSA.
- Melalih, K. (2012). Érosion éolienne et dégradation des sols dans le Hodna. Université de M'Sila, mémoire master.
- Meliani, S., et al. (2024). Effets de l'application d'herbicides sur les propriétés des sols agricoles en Algérie. Revue Scientifique Agronomique, 46(1), 59-76.
- Mimoune, S. (1995). Typologie des nappes phréatiques dans le Hodna. Revue d'hydrogéologie, 8, 44-53.
- Nicolas, P. (2019). Impacts des pesticides sur la qualité de l'eau. *Écologie & Environnement*, 27(2), 102–118.
- OMS. (2019). *Biopesticides and sustainable agriculture*. Genève : Organisation Mondiale de la Santé.



- Pansu, M., et al. (1999). *Méthodologie d'analyse des sols*. Éditions Techniques.
- Périket, S., Vivier, P., & Garnier, P. (2014). Produits phytosanitaires et gestion des cultures. *Revue Française d'Agronomie*, 44(2), 144–158.
- Ramade, F., Schreinemachers, P., & Tipraqsa, P. (2012). Pesticide use in agriculture: global trends and perspectives. *Journal of Environmental Management*, 100, 55–67.
- Salmane, A. (2023). Étude pédologique et hydrique de la région de Boussaâda. Mémoire doctoral, Université de M'Sila.
- Sbai, M., Zerarka, N., & Oukheira, D. (1992). Influence des vents sur l'érosion du sol. Séminaire spécialisé, Institut de géographie d'Alger.
- Soudani, A. (2022). Utilisation et impacts environnementaux des pesticides en Algérie. *Revue Nord Africaine des Sciences de l'Environnement*, 6(1), 33–49.
- Soudani, A., Benmouhoub, M., & Toumi, R. (2024). État des lieux des pesticides utilisés en Algérie : typologie et consommation régionale. *Revue Algérienne d'Agronomie Durable*, 7(1), 17–34.
- Suty, B. (2014). Luminosité et croissance végétale. Rapport d'expérimentation, AgroFrance.
- Tahar, R. (2017). Trends in pesticide use and regulation in France. *Environmental Studies Journal*, 15(3), 211–226.
- Tahar, R., et al. (2017). Impact de la pollution par les pesticides sur la qualité des terres agricoles. *Journal Algérien d'Agriculture Durable*, 12(4), 101–115.
- Van Dyk, J. S., & Pletschke, B. I. (2011). Review on the use of enzymes for the degradation of organophosphorus pesticides. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 46(6), 527–538. <https://doi.org/10.1080/03601234.2011.605206>
- Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29–38.
- Warren, G., Webster, T., & Behera, S. (1998). Impacts of weed management on crop yields. *Agricultural Reviews*, 20(3), 55–72.
- WHO. (2005). *Pyrethroids: Environmental Health Criteria 220*. Genève : World Health Organization.
- Zateroglu, S. (2021). Méthodes de mesure de l'ensoleillement. Bulletin technique, société météorologique.
- Zedam, B., et al. (2021). Effets des herbicides sur les caractéristiques physico-chimiques des sols en régions semi-arides. *Journal of Environmental Agriculture*, 19(2), 213–230

- Zembr, S., Ladghem, Y., &Salmane, A. (2016). Productions agricoles et ressources hydriques en région de Boussaâda. *Revue d’agriculture algérienne*, 19(2), 100-115.
- Zeroual, O. (2022). Précipitations et variabilité climatique au Hodna. *Revue climatique d’Algérie*.